

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ в машиностроении

Под редакцией Н.М. Капустина

Допущено

*Учебно-методическим объединением вузов по образованию
в области автоматизированного машиностроения
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлениям подготовки бакалавров
и магистров «Технология, оборудование и автоматизация
машиностроительных производств» и по направлению подготовки
дипломированных специалистов «Конструкторско-технологическое
обеспечение машиностроительных производств»
и «Автоматизированные технологии и производства»*



Москва
«Высшая школа»
2004

УДК 621.0
ББК 34.5
А 22

Рецензенты:

кафедра «Автоматизированные станочные системы и инструменты» МГТУ
МАМИ — зав. кафедрой проф. А.М. Кузнецов;
д-р техн. наук, проф. В.А. Тимирязев (МГТУ «Станкин»)

Авторы:

Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе,
Н.П. Дьяконова, М.С. Уколов

Автоматизация производственных процессов в машиностроении: Учеб. для вузов / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе и др.; Под ред. Н.М. Капустина. — М.: Высш. шк., 2004. — 415 с.: ил.

ISBN 5-06-004583-8

Приведены сведения по различным аспектам и видам автоматизации машиностроения, в том числе по комплексной автоматизации проектирования и изготовления изделий, автоматизации технологических процессов сборки. Значительное внимание уделено особенностям проектирования технологических процессов в условиях автоматизированного производства, математическому моделированию в технологических системах, автоматизации проектирования технологических процессов и управлению техническими объектами и процессами. Рассмотрены вопросы формирования виртуальных производственных систем на базе распределенных производственных систем, использования CALS-технологий и информационных технологий при проектировании и сопровождении изделий на этапах их жизненного цикла.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Автоматизированные технологии и производства». Может быть полезен специалистам, работающим в области машиностроительных технологий.

УДК 621.0
ББК 34.5

ISBN 5-06-004583-8

© ФГУП «Издательство «Высшая школа», 2004

Оригинал-макет данного издания является собственностью издательства «Высшая школа», и его репродуцирование (воспроизведение) любым способом без согласия издательства запрещается.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Список основных сокращений	9
Введение	11

Глава 1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ — ОСНОВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

1.1. Особенности проектирования технологических процессов в условиях автоматизированного производства	14
1.2. Основные принципы построения технологии механической обработки в автоматизированных производственных системах	16
1.3. Типовые и групповые технологические процессы	17
1.4. Основные требования к технологии и организации механической обработки в переналаживаемых автоматизированных производственных системах	25
1.5. Особенности разработки технологических процессов автоматизированной и роботизированной сборки	28
1.6. Направления развития машиностроительного производства	31
Вопросы для самопроверки	34

Глава 2

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ И СРЕДСТВА ИХ ОСНАЩЕНИЯ

2.1. Технологическое оборудование и принципы построения автоматизированных производственных систем	35
2.2. Производительность автоматизированных систем	38
2.3. Выбор технологического оборудования и промышленных роботов в автоматизированном производстве	49
2.4. Автоматизация загрузки, транспортирования и складирования изделий в условиях автоматизированного производства	61
2.5. Особенности конструкций инструмента и приспособлений в автоматизированном производстве	75
2.6. Компонентные схемы автоматизированных производственных систем	83
2.7. Экономическая эффективность автоматизации производства	90
Вопросы для самопроверки	94

Глава 3

НАДЕЖНОСТЬ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

3.1. Экономические и социальные аспекты надежности	95
3.2. Связь надежности с производительностью	100
3.3. Методы повышения надежности автоматизированных систем	106
3.4. Стендовые испытания на надежность	125
3.5. Контроль и диагностика качества продукции	131
Вопросы для самопроверки	174

Глава 4

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

4.1. Обеспечение точности при изготовлении деталей на станках с ЧПУ	176
4.2. Построение операций на станках с ЧПУ	182
4.3. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ	194
4.4. Моделирование процесса обработки поверхностей деталей в интерактивном режиме	206
Вопросы для самопроверки	214

Глава 5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ

5.1. Определение структуры и основных характеристик производственного процесса	216
5.2. Условия применения автоматической сборки.....	219
5.3. Последовательность проектирования технологического процесса автоматической сборки	224
5.4. Техничко-экономическая оценка вариантов технологического процесса автоматической сборки	232
5.5. Типовые и групповые технологические процессы сборки	234
Вопросы для самопроверки	236

Глава 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ

6.1. Требования к математическим моделям и их классификация	237
6.2. Структурные модели	243
6.3. Математические модели на различных иерархических уровнях	247

6.4. Моделирование работы автоматизированных систем	258
6.5. Интеграция автоматизированного проектирования изготовления деталей	263
6.6. Развитие информационных технологий и создание виртуальных производственных систем	267
Вопросы для самопроверки	273

Глава 7

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ПРОЦЕССАМИ

7.1. Общее представление об управлении технологическими объектами	274
7.2. Формирование управляющей информации	284
7.3. Исполнительные механизмы систем управления технологическими объектами	286
7.4. Измерительные устройства, датчики обратной связи	295
7.5. Формирование сигнала обратной связи	304
7.6. Моделирование систем управления технологическими объектами	306
7.7. Оптимальное управление технологическими объектами	319
7.8. Развитие систем управления технологическими объектами	323
Вопросы для самопроверки	326

Глава 8

ФОРМИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

8.1. Принцип многообъектного технологического проектирования в распределенных производственных системах	327
8.2. Разработка инвариантной информационной модели виртуальной производственной системы	333
8.3. Информационные обратные связи в виртуальной производственной системе	340
8.4. Методы и средства моделирования процесса формирования виртуальной производственной системы	344
8.5. Особенности технологического проектирования в виртуальной производственной системе	348
8.6. Разработка структуры и алгоритма процесса многообъектного технологического проектирования	353
Вопросы для самопроверки	358

Глава 9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

9.1. Разработка информационной модели процесса функционирования отдельного производственного модуля	359
9.2. Моделирование процесса функционирования совокупности модулей	364
9.3. Моделирование процесса назначения очередности поступления заданий в производственную систему	368
9.4. Моделирование процесса функционирования технологического оборудования виртуальной производственной системы	371
9.5. Формирование информационного обеспечения математических моделей функционирования технологического оборудования виртуальной производственной системы	374
Вопросы для самопроверки	376

Глава 10

МНОГООБЪЕКТНОЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В ВИРТУАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ

10.1. Основные этапы многообъектного технологического проектирования	378
10.2. Информационное обеспечение автоматизированного технологического проектирования	382
10.3. Методическое обеспечение многообъектного технологического проектирования	390
10.4. Интеллектуальное управление процессами технологического проектирования	397
10.5. Примеры реализации многообъектного автоматизированного технологического проектирования в виртуальной производственной системе	401
Вопросы для самопроверки	412
Заключение	413
Список литературы	414

Предисловие

Комплексная автоматизация производства является одним из основных направлений технической политики в нашей стране. Целью комплексной автоматизации является ускорение темпов повышения производительности труда, улучшение качества продукции и повышение ее конкурентоспособности, сокращение создания новых изделий.

Важным направлением единой технической политики является широкое использование информационных технологий, а также создание высокопроизводительного и высокоэффективного производства, обладающего возможностью быстрой переналадки при переходе с управления одного типа изделия на другой, т.е. создание гибких производственных систем (ГПС).

В настоящее время наметились тенденции создания виртуальных производственных систем на базе распределенных производственных систем.

Широкое использование информационных технологий робототехники, станков с ЧПУ, систем управления производственными объектами во многом способствует повышению эффективности производственных систем в машиностроении.

В предлагаемом учебнике рассматриваются вопросы, связанные с решением задач автоматизации производственных процессов в машиностроении.

В главе 1 изложены особенности проектирования технологических процессов в условиях автоматизированного производства. Рассмотрена сущность типовых и групповых технологических процессов.

В главе 2 обобщен опыт расчета производительности автоматизированных систем, так как производительность в автоматизированном производстве является одним из важных показателей. Здесь же приведена методика построения циклограмм функционирования робото-технических комплексов и гибких производственных модулей, описан выбор станочного оборудования и роботов, представлено инструмен-

тальное обеспечение и транспортно-складские системы. Дана структура производственных систем.

В главе 3 приведены показатели и методы оценки надежности, а также вопросы автоматизации контроля и диагностики.

Глава 4 посвящена автоматизации операций изготовления на станках с ЧПУ. Разобраны комплексные модели процесса обработки заготовок на станках с ЧПУ. Приведено моделирование процесса обработки на станках с ЧПУ.

В главе 5 рассмотрены задачи и методы автоматизации технологических процессов сборки.

Автоматизация машиностроения тесно связана с моделированием работы автоматизированных систем. В главе 6 математическое моделирование раскрыто как инструмент информационных технологий. Показано значение интеграции подсистем проектирования и использование концепции CALS-технологии.

Управление производственными процессами и объектами во многом определяет эффективность автоматизации (глава 7).

Структурная перестройка автоматизированных производств тесно связана с формированием виртуальных производственных систем в распределенных производственных системах (глава 8). Эта задача решается математическим моделированием в распределенных производственных системах (глава 9). Реализация разработанных моделей осуществляется многообъектным автоматизированным технологическим проектированием с интеллектуальным управлением в виртуальных производственных системах (глава 10).

Материал между авторами распределяется следующим образом:

Н.М. Капустин — предисловие, введение, § 1.6, гл. 6 и 9, заключение; Н.П. Дьяконова — гл. 1 и 2; М.С. Уколов — § 3.1 — 3.3, гл. 4; А.Г. Схиртладзе — § 3.4, 3.5; гл. 5; П.М. Кузнецов — гл. 7, 8, 10.

Считаем своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность рецензентам — коллективу кафедры «Автоматизированные станочные системы и инструменты» МГТУ «МАМИ» (зав. кафедрой д-р техн. наук, профессор А.М. Кузнецов) и д-р техн. наук, профессору В.А. Тимирязеву (МГТУ «Станкин»).

Замечания и пожелания просим присылать по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Авторы

Список основных сокращений

АЛ	— автоматическая линия
АП	— автоматизированное производство
АПС	— автоматизированная производственная система
АС	— автоматизированная система
АСКИО	— автоматизированная система контроля и измерения объекта
АСНИ	— автоматизированная система научных исследований
АСС	— автоматизированная станочная система
АСУ	— автоматизированная система управления
АСУП	— автоматизированная система управления производством
АСУТП	— автоматизированная система управления технологическим процессом
АТСС	— автоматизированная транспортно-складская система
АУ	— автоматизированный участок
АЦ	— автоматизированный цех
БД	— база данных
БЗ	— база знаний
БЗУ	— бункерно-загрузочное устройство
БнД	— банк данных
ВПС	— виртуальная производственная система
ГАП	— гибкое автоматизированное производство
ГПМ	— гибкий производственный модуль
ГПУ	— гибкий производственный участок
ГПС	— гибкая производственная система
ИГ	— измерительная головка
ИПК	— интегрированный производственный комплекс
КИМ	— контрольно-измерительная машина
КТЭ	— конструктивно-технологический элемент
ММ	— математическая модель
МП	— микропроцессор
МС	— многоцелевой станок
ОПС	— обобщенная производственная система
ОС	— обратная связь
ОТС	— организационно-техническая структура

ПЗ	— производственное задание
ПМ	— производственный модуль
ПР	— промышленный робот
ПС	— производственная система
ПУ	— программное управление
ПО	— программное обеспечение
ПЯ	— производственная ячейка
РПС	— распределенная производственная система
РТК	— робото-технический комплекс
САК	— система автоматизированного контроля
САП	— система автоматического программирования
САПР	— система автоматизированного проектирования
СДРИ	— система диагностики режущего инструмента
СУ	— система управления
СУБД	— система управления базами данных
СЧПУ	— система числового программного управления
ТЗ	— техническое задание
ТО	— технический (технологический) объект
ТОБ	— техническое обслуживание
ТОТ	— типизированная операционная технология
ТП	— технологический процесс
ТПП	— технологическая подготовка производства
ТС	— технологическая система
ТСД	— техническое средство диагностики
УП	— управляющая программа
УЧПУ	— устройство числового программного управления
ЧПУ	— числовое программное управление
ЦПП	— цифровой преобразователь перемещений
ШД	— шаговый двигатель
ЭС	— экспериментальная система

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация производственных процессов имеет важное значение на современном этапе развития машиностроения при становлении рыночных отношений. Основой производственных процессов являются автоматизированные технологические процессы механической обработки и сборки, которые обеспечивают высокую производительность и необходимое качество изготавливаемых изделий.

Современное отечественное машиностроение должно развиваться в направлении автоматизации производства с широким использованием ЭВМ и роботов, внедрения гибких технологий, позволяющих быстро и эффективно перестраивать технологические процессы на изготовление новых изделий. Автоматизация проектирования технологии и управления производственными процессами — один из основных путей интенсификации производства, повышения его эффективности и качества продукции.

Характерным признаком современного производства является частая сменяемость изделий. При этом требования к производительности в условиях мелко- и среднесерийного производства значительно возрастают. Противоречия требований мобильности и производительности находят разрешение в создании гибких производственных систем (ГПС). Высокая эффективность производства достигается рациональным сочетанием оборудования, организацией транспортных операций и управления ГПС. Растет выпуск станков с ЧПУ и роботов, в особенности с CNC-управлением.

В роботизации наметился коренной поворот — от транспортно-загрузочных роботов к технологическим: в конструкциях роботов используются подвесные конструкции, поворотные звенья, электромеханические приводы и т. д.

Наиболее высокая эффективность мероприятий по автоматизации производственных процессов присуща предприятиям, характеризующимся большой серийностью выпускаемых изделий, высокой надежностью автоматизированных процессов, минимальной частотой и длительностью переналадок, минимальными дополнительными затратами

на автоматизированное оборудование, с большим опытом автоматизации.

Использование гибких производственных систем и технологических модулей позволяет изготавливать детали в любом порядке и варьировать их выпуск в зависимости от производственной программы, сокращает затраты и время на подготовку производства, повышает коэффициент использования оборудования, изменяет характер работы персонала, повышая удельный вес творческого, высококвалифицированного труда.

Наметились три направления, по которым идет решение проблемы повышения эффективности инженерного труда в сфере проектирования:

- рационализация системы проектирования, включая систематизацию самого процесса проектирования и улучшение организации труда инженера-проектировщика;
- комплексная автоматизация умственно-формальных, нетворческих функций инженера-проектировщика в процессе проектирования;
- разработка имитационных моделей для воспроизводства на ЭВМ умственной деятельности человека, его способности принимать решения в условиях полной и частичной неопределенности проектных ситуаций, разработки эвристических алгоритмов, позволяющие качественно решать сложные задачи проектирования при введении определенных ограничений.

Тенденцией современного этапа автоматизации проектирования является создание комплексных систем автоматизированного проектирования и изготовления, включающих конструирование изделий, технологическое проектирование, подготовку управляющих программ для оборудования с программным управлением, изготовление деталей, сборку узлов и машин, упаковку и транспортирование готовой продукции.

Одним из путей к успешному внедрению системы CAD/CAM является реализация принципов групповой технологии, основанной на использовании оборудования, планировании и организации производства по принципу технологической общности деталей.

Если выпуск изделий осуществляется с использованием ГПС, то система автоматизации проектирования технологических процессов прежде всего должна обеспечивать их гибкость. Под гибкостью понимается возможность быстрого перехода на новые технологические процессы в связи с изменением факторов, определяющих качество выпускаемых деталей (точность, качество поверхностного слоя и др.) и

производительность. При изменении конструктивных параметров детали технологическая система (технологические системы) должна (должны) количественно и качественно переналаживаться в сжатые сроки при минимальных затратах.

Таким образом, тенденцией современного этапа автоматизации проектирования является создание комплексных систем, включающих конструирование изделий, технологическое проектирование и изготовление изделий в ГПС. Спроектированный технологический процесс должен оперативно реагировать на изменение производственных ситуаций процесса изготовления изделий.

Повышение требования конкурентоспособности продукции машиностроения требует новых производительных систем. Для этого создают виртуальные производственные системы (информация о ее структуре хранится только в памяти ЭВМ) на основе распределенных производственных систем (отдельные производственные системы, организационно не связанные между собой и имеющие технологическое оборудование). При этом решаются задачи организации и управления.

Организация виртуальной производственной системы напрямую связана с технологическим содержанием реализуемых проектов. Процессы организации виртуальной производственной системы и технологического проектирования взаимосвязаны. Имеют место прямые и обратные связи информационных потоков. Создаваемая система управления функционирует, как правило, без участия человека.

Глава 1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ — ОСНОВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

1.1. Особенности проектирования технологических процессов в условиях автоматизированного производства

Основой автоматизации производства являются технологические процессы (ТП), которые должны обеспечивать высокую производительность, надежность, качество и эффективность изготовления изделий. С этой точки зрения большое значение приобретают прогрессивные высокопроизводительные методы обработки и сборки, используемые при проектировании автоматизированных ТП.

При разработке ТП автоматизированного производства (АП) рассматривают комплексно все его элементы: загрузку-выгрузку изделий, их базирование и закрепление, обработку, контроль, межоперационное транспортирование и складирование и др. Поэтому для оценки возможности и эффективности автоматизации важно правильно классифицировать ТП.

Характерной особенностью ТП обработки и сборки является строгая ориентация деталей и инструмента относительно друг друга в рабочем процессе — первый класс процессов. Другие виды обработки (термообработка, сушка, окраска и пр.), которые не требуют строгой ориентации детали, относят ко второму классу процессов.

Кроме того, ТП по непрерывности подразделяют на дискретные и непрерывные. Дискретные процессы характеризуются прерывистостью и строгой последовательностью рабочих и холостых движений, непрерывные — не прерываясь, изменяются плавно, без скачков (например, бесцентровое шлифование, протягивание). Это разделение носит условный характер, так как большинство процессов сочетает дискретность с непрерывностью.

Для обеспечения высокой производительности и надежности проводят дифференциацию ТП, т.е. делят его на упрощенные технологические переходы (позиции). По мере возможности для уменьшения

длины транспортных путей и числа операций, а также в силу технической целесообразности осуществляют концентрацию переходов и позиций на едином оборудовании в одну операцию. Эффективность этих мероприятий устанавливается технико-экономическими расчетами, обязательно сопровождающими проектирование ТП автоматизированного производства.

Разработка технологических процессов АП характеризуется следующими особенностями:

- автоматизированные ТП включают не только разнородные операции механической обработки, но и обработку давлением, термообработку, сборку, контроль, упаковку, а также транспортно-складские и другие операции;
- требования к гибкости и автоматизации производственных процессов диктуют необходимость комплексной и детальной проработки технологии, тщательного анализа объектов производства, проработки маршрутной и операционной технологии, обеспечения надежности и гибкости процесса изготовления изделий с заданным качеством. Степень подробности технологических решений должна быть доведена до уровня подготовки управляющих программ для оборудования;
- при широкой номенклатуре изделий технологические решения многовариантны;
- возрастает степень интеграции работ, выполняемых различными технологическими подразделениями.

Насущные требования по совершенствованию и сокращению сроков технологической подготовки производства вызвали необходимость в принципиально новом подходе к проектированию ТП с использованием методов систем автоматизированного проектирования (САПР). Повышению эффективности автоматизированной разработки ТП во многом способствует рациональное сочетание типовых и индивидуальных технологических решений на всех стадиях проектирования, а также высокий уровень стандартизации и унификации изделий, оборудования и самих технологических процессов, позволяющих создавать и использовать соответствующие базы данных на основе информационных технологий.

Внедрение гибкой технологии (технологии переналаживаемого производства) с широким использованием компьютерной техники и переналаживаемых средств автоматизации позволяет быстро и эффективно перестраивать ТП на изготовление новых изделий. Последнее весьма актуально в условиях мелкосерийного и серийного производства, преобладающего в машиностроении.

1.2. Основные принципы построения технологии механической обработки в автоматизированных производственных системах

Раскрыть потенциальные возможности АПС и обеспечить их максимальную эффективность можно только тогда, когда проектированию АПС предшествуют глубокие технологические разработки, соблюдение основных принципов технологии. Рассмотрим некоторые из них.

1. *Принцип завершенности* заключается в том, что следует стремиться к выполнению всех операций в пределах одной АПС без промежуточной передачи полуфабрикатов в другие подразделения или вспомогательные отделения. Для реализации принципа необходимы: обеспечение требований по технологичности изделий; разработка новых унифицированных методов обработки и контроля; расширение и обоснование типажа оборудования АПС с повышенными технологическими возможностями.

2. *Принцип малооперационной технологии* заключается в формировании ТП с максимально возможным укрупнением операций, с минимальным числом операций и установок в операциях. Для реализации принципа необходимы те же мероприятия, что и для принципа 1, а также оптимизация маршрутов и операционной технологии, применение методов автоматизированного проектирования ТП.

3. *Принцип «малолюдной» технологии* заключается в обеспечении автоматической работы АПС в пределах всего производственного цикла. Для реализации принципа необходимы: стабилизация отклонений входных технологических параметров АПС (заготовок, инструментов, станков, оснастки); расширение и повышение надежности методов операционного информационного обеспечения; переход к гибким адаптивным системам управления СУ ТП со статистической коррекцией УП.

4. *Принцип «безотладочной» технологии* заключается в разработке ТП, не требующих отладки на рабочих позициях. Принцип особенно актуален для широкономенклатурных АПС, он близок к принципу 3. Для его реализации необходимы те же мероприятия, что и для принципа 3.

5. *Принцип активно-управляемой технологии* заключается в организации управления ТП и коррекции проектных решений на основе рабочей информации о ходе ТП. Корректировать можно как технологические параметры, формируемые на этапе управления, так и исходные параметры технологической подготовки производства (ТПП). Для реализации принципа необходимы: разработка методов и алгоритмов

адаптивного управления ТП; разработка методов статистической коррекции базы данных (БД) для создания самообучающихся АПС.

6. *Принцип оптимальности* заключается в принятии решения на каждом этапе ТПП и управлении ТП на основе единого критерия оптимальности. Для реализации принципа необходимы: разработка теоретических основ оптимизации ТП; разработка алгоритмов оптимизации для условий работы АПС; разработка специальных технических, аппаратных, программных средств реализации указанных алгоритмов. Принцип оптимальности создает единую методическую основу решения технологических задач на всех уровнях и этапах, позволяет выработать наиболее эффективное, однозначное и взаимоувязанное решение указанных задач.

Помимо рассмотренных для технологии АПС характерны и другие принципы: компьютерной технологии, информационной обеспеченности, интеграции, безбумажной документации, групповой технологии. Все они объединены в единую систему ТПП и управления, что позволяет говорить *о создании принципиально новой технологии АПС*, реализующей наиболее эффективные технические решения и максимально раскрывающей потенциальные технические и технологические возможности АПС. Последний принцип групповой технологии является фундаментальным для всех АПС, так как именно он обеспечивает «гибкость» производства.

1.3. Типовые и групповые технологические процессы

Методы типовой и групповой технологии, позволяющие свести к минимуму индивидуальные технологические разработки, широко используют при автоматизации ТПП.

Типизация ТП для сходных по конфигурации и технологическим особенностям групп деталей предусматривает их изготовление по одинаковым ТП, основанным на применении наиболее совершенных методов обработки и обеспечивающим достижение наивысшей производительности, экономичности и качества. Основу типизации составляют правила обработки отдельных элементарных поверхностей и правила назначения очередности обработки этих поверхностей. Типовые ТП находят применение главным образом в крупносерийном и массовом производстве.

Принцип групповой технологии лежит в основе технологии переналаживаемого производства — мелко- и среднесерийного. В отличие от типизации ТП при групповой технологии общим признаком объединения деталей в группы является общность обрабатываемых поверхностей и их сочетаний, т. е. общность оборудования, необходи-

мого для обработки детали или отдельных ее поверхностей. Очевидно, что в состав группы можно включать заготовки различной конфигурации и даже различных типов.

В этом смысле понятие группы значительно шире понятия типа деталей, являющегося основой построения типового процесса. Поэтому групповые методы обработки характерны для обработки деталей с широкой номенклатурой.

И типизация ТП, и метод групповой технологии являются основными направлениями унификации технологических решений, повышающей эффективность производства. Для их реализации необходимы классификация деталей, отработка их конструкций на технологичность с одновременной унификацией конструктивно-технологических элементов (КТЭ) этих деталей.

Классификация деталей

Классификацию деталей проводят в целях определения групп технологически однородных деталей для их совместной обработки в условиях группового производства. Выполняют ее в два этапа: первичная классификация — кодирование деталей обследуемого производства по конструктивно-технологическим признакам; вторичная классификация — группирование деталей с одинаковыми или несущественно отличающимися признаками классификации.

Состав признаков устанавливают с учетом особенностей анализируемого производства. При классификации деталей нужно учитывать следующие признаки: конструктивные — в соответствии с классификатором ЕСКД; габаритные размеры, массу, материал, вид обработки и заготовки; число операций обработки; точностные и другие показатели, определяемые особенностями объектов исследования.

Группирование деталей по конструктивно-технологическим признакам и выбор деталей-представителей выполняют методом сопоставления запросов на группирование с перечислением признаков первичной классификации в такой последовательности: выбор совокупности деталей на уровне классов, например, тела вращения для механообрабатывающего производства; выбор совокупности деталей на уровне подкласса, например, детали типа вала; классификация деталей по комбинации поверхностей, например, валы с комбинацией гладких цилиндрических поверхностей; группирование по габаритным размерам с выделением областей с максимальной плотностью распределения размеров (рис. 1.1); определение по диаграмме областей с наибольшим числом наименований деталей. Эти области формируют группы по конструктивным признакам; в таких

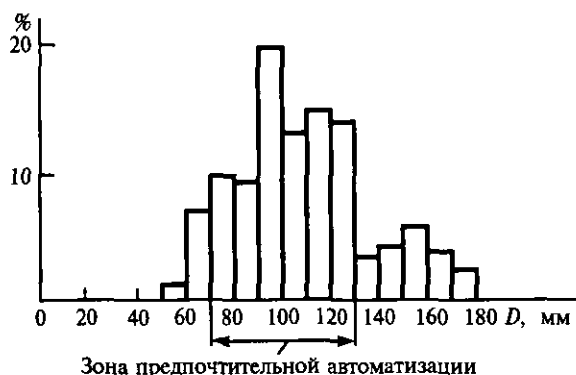


Рис. 1.1. Пример диаграммы частоты распределения коротких тел вращения (подклассы 711, 712) по диаметру

группах определяют подгруппы с общностью технологических признаков; в каждой подгруппе выбирают типовой представитель по критерию максимума операций ТП; выполняют укрупненное нормирование операций обработки типового представителя по каждой группе деталей; определяют укрупненно суммарную станкоемкость по каждой операции на группу изделий с учетом годового выпуска всех деталей группы:

$$Q_{ij} = t_{\text{шт}ij} N_i,$$

где Q_{ij} — станкоемкость обработки i -й операции j -й группы деталей; $t_{\text{шт}ij}$ — штучное время обработки по i -й операции типового представителя j -й группы; N_i — годовой выпуск изделий i -й группы.

Одним из факторов, определяющих приоритет автоматизации, является станкоемкость групповой обработки. Итоговые данные удельного веса станкоемкости обработки рассчитывают для каждой группы деталей. Этот показатель необходим для определения целесообразности и очередности автоматизации.

При большой номенклатуре деталей и трудностях с выполнением кодирования и группирования допускается анализ выпускаемой продукции по ее основным группам. В этом случае по каждой группе деталей определяют деталь-представитель, имеющую наибольшее число общих признаков, присущих деталям данной группы. Остальные детали являются модификациями базовой детали.

Полученную в результате классификации деталей информацию формализуют и используют для формирования БД по объектам производства. Применение информационных технологий позволяет использовать эти БД при выборе технологии, основного и вспомогательного оборудо-

дования, оснастки и инструмента. При этом значительное упрощение и удешевление конструирования и производства машин за счет резкого сокращения типажа приспособлений, режущего и мерительного инструментов, инструментальных наладок и использования типовых технологических модулей (модульной технологии) возможно на основе унификации КТЭ деталей машин и точностных параметров.

Основой унификации деталей и элементов являются их классификация по конструктивно-технологическим признакам и последующий статистический анализ точностных и геометрических параметров унифицируемых деталей и элементов. Унификация конструктивных элементов деталей и сборочных единиц заключается в системном подходе к формированию групп элементов по их геометрическим, точностным, технологическим признакам, выделению ограниченного количества типовых представителей этих групп на основе статистического анализа. Унификация элементов и их параметров должна сопровождаться тщательным анализом функционального назначения детали и узла, особенностей их конструкции и эксплуатации, технологических возможностей производства, т. е. унификация конструктивно-технологических элементов (наружных цилиндрических поверхностей, расточек, канавок, пазов и т. д.) должна проводиться на стадии отработки конструкций изделий на технологичность.

Технологичность конструкций изделий для условий автоматизированного производства

Оценка и отработка конструкций изделий на технологичность — один из важнейших этапов технологической подготовки производства, и в особенности автоматизированного. Конструкция изделия считается технологичной, если для его изготовления и эксплуатации требуются минимальные затраты материалов, времени и средств. Оценку технологичности проводят по качественным и количественным критериям отдельно для заготовок, обрабатываемых деталей, сборочных единиц.

Для повышения надежности автоматизированного производства (АП) необходимо максимально приблизить форму и размеры заготовки к конечной форме и размерам детали, т. е. обеспечить достижение минимальных припусков на каждой операции.

Детали, подлежащие обработке в АП, должны быть технологичны, т. е. просты по форме, габаритам, состоять из стандартных поверхностей и иметь максимальный коэффициент использования материала. Детали, подлежащие сборке, должны иметь как можно больше стандартных поверхностей, соединений, простейших элементов ориентации сборочных единиц и деталей.

Особое значение имеют вопросы технологичности деталей и сборочных единиц при обработке на станках с ЧПУ, в гибких АП. Здесь особое значение имеют унификация и стандартизация форм, размеров, условий обработки и сборки для использования типового оборудования и унифицированных средств автоматизации вспомогательных операций, например схватов промышленных роботов.

Типизация технологических процессов и метод группового изготовления деталей

Проведение типизации ТП для сходных по конфигурации и технологическим особенностям деталей предусматривает их изготовление по одинаковым ТП, основанным на применении наиболее совершенных методов обработки и обеспечивающим достижение наивысшей производительности, экономичности и качества.

Типовые процессы разрабатывают на изготовление в конкретных производственных условиях типовых представителей групп изделий, обладающих общими конструктивно-технологическими признаками. К типовым представителям относят те изделия, обработка которых требует наибольшего количества операций, характерных для изделий рассматриваемых групп. Типовые ТП находят применение главным образом в крупносерийном и массовом производстве.

Типизация ТП является одним из основных направлений технологической унификации наряду с групповым методом обработки деталей. Групповые ТП получили распространение в условиях единичного, мелкосерийного и серийного производств. Частично их применяют в условиях крупносерийного и массового производства для деталей с коротким производственным циклом.

Методика типизации, основанная на классификации деталей, их элементов, ТП обработки и комплексном решении всех задач, возникающих при выполнении процессов каждой классификационной группы, была впервые разработана проф. А.П. Соколовским.

К классификационным признакам деталей относят: конфигурацию (форма), размер, точность и качество обработанных поверхностей, материал. Классификация построена по схеме класс — подкласс — группа — тип. На рис. 1.2 приведена схема классификации деталей класса реек. Конечной целью классификации деталей является установление типов деталей, т. е. совокупностей сходных деталей, имеющих в данных производственных условиях общий ТП. Целью же разработки типовых технологических процессов является систематизация ТП для обработки однотипных деталей.

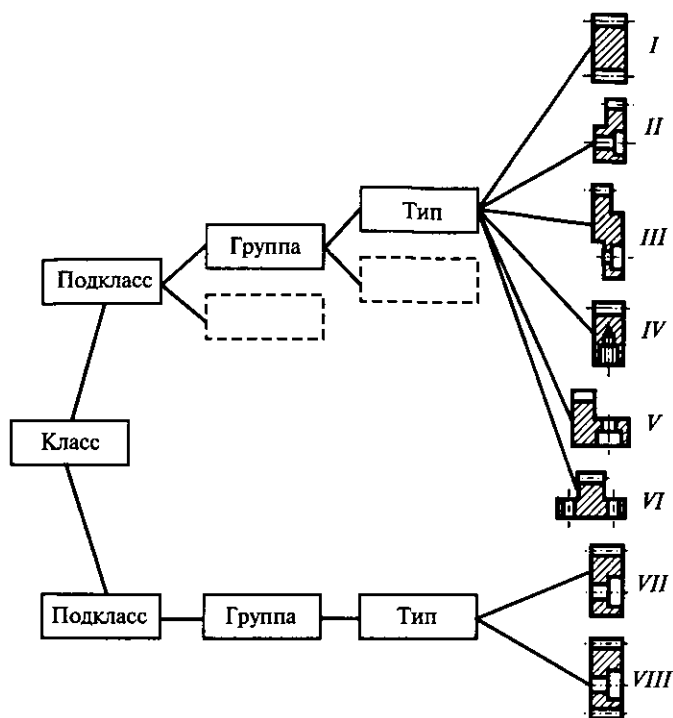


Рис. 1.2. Схема классификации деталей класса реек

В настоящее время при типизации в основном используют три направления:

- 1) типизация ТП безотносительно к деталям производства, сам технологический процесс является основой классификации и типизации;
- 2) типизация ТП, основанная на классификации деталей;
- 3) типизация на основе сочетания типового ТП с классификацией реальных деталей.

Первое направление — типовой ТП разрабатывают как образцовый, обеспечивающий применение передовой техники и технологии. Типовой процесс служит базой для проектирования нового оборудования. Направление применяют при разработке новых ТП в таких производствах, как металлургическое, литейное, прокатное, химическое.

Второе направление — разработка типовых ТП для реальных деталей — обеспечивает наиболее прогрессивные методы изготовления деталей машин и приборов. Направление наиболее распространено в машиностроении.

Третье направление — комбинированное — применяют при кор-

ректировке разработанных типовых ТП, в отдельных случаях меняется и конструкция деталей.

Независимо от указанных направлений типовые ТП разрабатывают как для конкретных производственных условий (оперативный типовой процесс), так и для перспективного развития производства — перспективный типовой ТП, предусматривающий дальнейшее совершенствование производства с учетом развития науки и техники в области технологии. Необходимость разработки типовых процессов определяется экономической целесообразностью, зависящей от количества изделий в группах и частоты их применяемости.

Создание типовых ТП позволяет избегать повторных и новых работ при проектировании рабочих ТП, что ведет к сокращению времени на технологическую подготовку производства и особенно эффективно при создании БД типовых ТП и использовании информационных технологий на стадии технологических разработок.

Групповые ТП — второе направление унификации ТП (впервые предложенные и разработанные проф. С.П. Митрофановым) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности.

За основу метода, так же как и при типизации ТП, принимают технологическую классификацию деталей, заканчивающуюся формированием групп. Однако построение классификации деталей для групповой обработки существенно отличается от классификации деталей при типизации ТП. Если при типизации процессов в общий класс объединяют детали и заготовки по принципу общности их конфигурации, технологического маршрута, отдельных операций, то при групповой обработке основным признаком объединения деталей в группы по отдельным технологическим операциям является общность обрабатываемых поверхностей или их сочетаний, т. е. общность оборудования, необходимого для обработки детали или отдельных ее поверхностей. Очевидно, что в состав группы могут включаться заготовки различной конфигурации (рис. 1.3). В этом смысле понятие группы значительно шире понятия типа деталей, являющегося основой построения типового процесса. Поэтому групповые методы обработки характер-

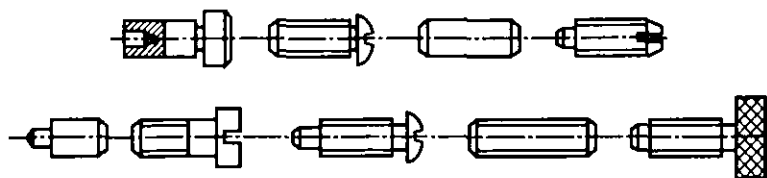


Рис. 1.3. Примеры деталей, обрабатываемых по одному групповому ТП

ны для обработки деталей с широкой номенклатурой, типичной для единичного, мелкосерийного производства. Именно в этих условиях данный метод создает все необходимые предпосылки для организации группового производства, которое характеризуется совместным изготовлением или ремонтом групп изделий различной конфигурации на специализированных рабочих местах.

При формировании групп деталей учитывают следующие признаки: общность обрабатываемых поверхностей, их точность и шероховатость, однородность материала заготовок, близость их размеров, позволяющая обрабатывать детали на одном и том же оборудовании в однотипных приспособлениях, серийность выпуска и трудоемкость обработки деталей. В условиях единичного, мелкосерийного производства в группы объединяют до 60–80 деталей. Проводят экономический расчет размеров групп и разрабатывают схему групповой наладки каждого станка для наиболее сложной заготовки группы, включающей в себя все поверхности, встречающиеся у остальных заготовок. Если у сложных заготовок отсутствуют поверхности, характерные для других более простых заготовок, то эти поверхности искусственно добавляют в чертежи. Такую усложненную деталь называют комплексной. В настоящее время групповые процессы разрабатывают для обработки деталей на токарных автоматах, револьверных, агрегатных и многооперационных станках (обрабатывающих центрах).

Типизация ТП, методы групповой обработки деталей позволяют не только существенно сократить трудоемкость технологической подготовки производства, снизить затраты на оборудование и оснастку, но и обеспечивают максимальную загрузку станков (загрузка станков с ЧПУ повышается в 2,4 раза), повышают серийность деталей. Именно эти направления автоматизации производства делают весьма перспективным создание комплексной системы типовых ТП (модулей) и агрегируемого специализированного оборудования. Использование технологических модулей может обеспечить выбор наиболее прогрессивных ТП и на 30...35 % снизить трудоемкость их разработки. Применение конструктивных модулей позволяет сокращать сроки проектирования нового оборудования в 3–4 раза, а также выбирать оптимальные конструкторские решения.

1.4. Основные требования к технологии и организации механической обработки в переналаживаемых автоматизированных производственных системах

Для разработки технологии в АПС характерен комплексный подход — детальная проработка не только основных, но и вспомогательных операций и переходов, включая транспортировку изделий, их контроль, складирование, испытания, упаковку.

В силу необходимости и возможности быстрой переналадки при серийном и мелкосерийном производстве в АПС для каждой возможной детали (изделия) или типоразмера должна быть разработана подробная технология изготовления с возможными отклонениями, разработаны специальные или универсальные приспособления, в том числе спутниковые. Условия транспортировки, контроля, испытания, упаковки должны быть соответствующим образом определены и запрограммированы. Это необходимо для обеспечения быстрого перехода с одного изделия на другое буквально в течение суток или смены. Детальная проработка всего ТП предполагает широкую унификацию конструктивно-технологических элементов обрабатываемых деталей для обеспечения возможности смешанного агрегатирования операций и оборудования.

Для стабилизации и повышения надежности обработки применяют два основных метода построения ТП:

- 1) использование оборудования, обеспечивающего надежную обработку почти без участия оператора;
- 2) регулирование параметров ТП на основе контроля изделий в ходе самого процесса.

Для повышения гибкости и эффективности АПС предпочтительно использовать принцип групповой технологии, позволяющий обрабатывать на одном и том же оборудовании большую группу разнотипных деталей с минимальными затратами на переналадку.

Указанные принципы реализованы при создании технологии обработки основных типовых деталей: корпусных и в форме тел вращения.

При обработке корпусных деталей предпочтение отдается многоинструментальным станкам с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». При разработке технологии для «обрабатывающих центров» учитывают ряд предложений:

- технологические переходы обработки элементарной поверхности детали выбирают по технологическим схемам — комплексам последовательных технологических переходов, необходимых для обеспечения требуемого качества обработки;
- назначают последовательность переходов: фрезерование внешних и внутренних поверхностей, пазов, контуров; обработка

основных и вспомогательных отверстий большого диаметра; обработка вспомогательных отверстий малого диаметра;

- обеспечивают минимальное число смен инструментов и поворотов стола с деталью, особенно при обработке точных отверстий с жесткими допусками по расположению. Стремятся к минимальным изменениям относительного положения детали и инструмента;
- обеспечивают обработку базовых поверхностей за одну установку;
- последовательность черновых переходов определяют исходя из условия уменьшения $t_{\text{всп}}$; последовательность полустачек и чистовых переходов — исходя из уменьшения количества изменений положения инструмента и детали в плоскости, перпендикулярной оси обработки. Последовательность переходов обработки точных поверхностей устанавливают с целью уменьшения суммарной погрешности $\Delta_{\Sigma} = f(\Delta_i)$.

При увеличении серийности выпуска корпусных деталей их обработку производят на переналаживаемых автоматических линиях (АЛ), агрегатных станках, модулях со сменными агрегатными головками, обрабатывающих центрах с использованием комбинированного инструмента, специальных приспособлений.

Обработку деталей в форме тел вращения осуществляют в основном на токарных станках с ЧПУ и гибких модулях на их основе. Для улучшения качества обработки широко применяют проверенную в конкретных производственных условиях типизированную операционную технологию (ТОТ).

Основой построения ТОТ обработки деталей на станках с ЧПУ является совокупность правил обработки отдельных элементарных поверхностей. Типизированная операционная технология должна быть построена так, чтобы обеспечить для всего многообразия деталей, закрепленных за станком с ЧПУ, производительность и надежность обработки в автоматическом цикле.

Для создания ТОТ всю поверхность заготовки представляют в виде основных и дополнительных поверхностей. *Основные поверхности*: цилиндрические, конические поверхности с криволинейными образующими, неглубокие канавки. При их образовании удаляют 85–90 % всего припуска на обработку. *Дополнительные поверхности*: канавки на внутренних и наружных поверхностях, резьбовые поверхности.

Независимо от вида закрепления заготовки на станке (в кулачковом самоцентрирующем патроне, в центрах с поводком) применяют следующий *маршрут обработки*: черновая обработка основных повер-

хностей, подрезка торцов; обработка дополнительных поверхностей, не требующих черновой обработки.

При обработке деталей в форме тел вращения на токарных станках крупными сериями выявлены следующие особенности:

- 1) увеличение производительности за счет широкого применения комбинированного инструмента (сокращение $t_{\text{осн}}$ и $t_{\text{всп}}$);
- 2) использование осевого мерного инструмента (развертки, зенкера);
- 3) упрощение траекторий перемещения инструментов;
- 4) сокращение числа поверхностей, обрабатываемых одним режущим элементом (резцом), переход к многоинструментальным наладкам последовательного и параллельного действия.

Рассмотренные особенности обработки корпусных деталей и деталей в форме тел вращения могут быть реализованы при создании технологии их обработки на автоматизированных участках (АУ) и линиях. В зависимости от серийности производства в состав участков и линий могут входить станки с ЧПУ, роботизированные модули, агрегатные станки, специальное и специализированное технологическое оборудование.

При обработке деталей на автоматических линиях — непрерывно действующих комплексах взаимосвязанного оборудования и систем управления — необходимо обеспечивать временную синхронизацию операций и переходов. Наиболее эффективными методами синхронизации являются концентрация и дифференциация ТП.

Дифференциация ТП, упрощение и синхронизация переходов являются необходимыми условиями надежности и производительности. Однако есть свои рациональные пределы дифференциации ТП и упрощения переходов. Чрезмерная дифференциация приводит к усложнению обслуживающего оборудования, увеличению площадей и объема обслуживания.

Целесообразную концентрацию операций и переходов, не снижая практически производительность, можно осуществить путем агрегирования и применением многоинструментальных наладок.

Для синхронизации работы в АЛ выделяют лимитирующий инструмент, лимитирующий станок и лимитирующий участок, по которым определяется реальный такт выпуска АЛ, мин, по формуле

$$\tau = \frac{60\Phi}{N},$$

где Φ — действительный фонд работы оборудования, ч; N — программа выпуска, шт.

Для обеспечения высокой надежности АЛ делят на участки, которые связаны друг с другом через накопители, осуществляющие так на-

зывается гибкая связь между участками, обеспечивая независимую работу смежных участков в случае отказа на одном из них. Внутри участка сохраняется жесткая связь, которая структурно проще. Для оборудования с жесткой связью важно планировать время и длительность плановых остановок, например, для групповой смены инструмента, ремонта, обслуживания. Оптимальное количество оборудования внутри участка, количество участков, емкости промежуточных накопителей определяют расчетным путем, исходя из обеспечения максимальной производительности и минимальной стоимости линии.

1.5. Особенности разработки технологических процессов автоматизированной и роботизированной сборки

Для технологической подготовки сборочного производства, так же как и для механообработки, характерен комплексный подход. Он подразумевает тщательную проработку технологичности изделия, типизацию процессов сборки, проработку вспомогательных процессов транспортирования собираемых изделий, их установки на сборочных позициях, контроля и испытания, широкое внедрение нормализованного и переналаживаемого сборочного оборудования.

Важным условием разработки рационального ТП автоматизированной сборки является унификация и нормализация соединений, т.е. приведение их к определенной номенклатуре видов и точностей. На основе унификации и нормализации соединений в сборочных единицах и изделиях разрабатывают типовые сборочные процессы (операции и переходы), выполняемые на типовом сборочном оборудовании с использованием типовых инструментов и приспособлений

В условиях крупносерийного и массового производства автоматизированная сборка изделий выполняется на сборочных автоматах и АЛ. В зависимости от сложности изделий используют одно- и многопозиционные сборочные автоматы. Последние применяют, например, при сборке подшипников качения. В линиях сборочные автоматы размещают линейно или по замкнутому контуру. Перемещение изделий осуществляется с помощью шаговых транспортеров или на приспособлениях-спутниках.

Главным отличием роботизированного производства является замена сборщиков сборочными роботами и выполнение контроля контрольными роботами или автоматическими контрольными устройствами.

Если в условиях АП сборку изделий можно выполнять методом полной или частичной взаимозаменяемости, с применением методов селективной сборки и использованием контрольно-сортировочных автома-

тов, а также с ограниченным применением методов пригонки и регулировки, то роботизированная сборка должна выполняться по принципу полной взаимозаменяемости или (реже) по принципу групповой взаимозаменяемости. При этом исключается возможность подгонки, регулировки. Строго должны быть соблюдены принципы выбора и постоянства баз, которые определяют качество собираемых изделий и надежность работы сборочных робото-технических комплексов (РТК).

Основные этапы автоматизированной сборки:

- автоматическая ориентация деталей и основных частей изделия для использования автоматизированных транспортно-захватных устройств, контроль и очистка деталей;
- автоматическое выполнение соединений;
- транспортирование деталей и узлов;
- межоперационный контроль;
- окончательный контроль;
- упаковка.

Выполнение операций сборки должно проходить от простого к сложному: деталей — в подузлы, подузлы — в узлы, узлы — в агрегаты, узлы и агрегаты — в изделие, что учитывается при составлении схем сборки. В зависимости от сложности и габаритов изделий выбирают форму организации сборки: стационарную или конвейерную. Стационарная сборка возможна без перемещения изделия, с подводом сборочных узлов и деталей к базовой сборочной единице (детали, узлу и т. д.). Конвейерная сборка возможна, когда роботы обслуживают рабочие места с различной ориентировкой и погрешностью позиционирования деталей и узлов.

В структуру роботизированного комплекса должны входить сборочное оборудование и приспособления, объединенные с транспортно-загрузочной системой и системами управления различных уровней и расположенные в технологической последовательности, поэтому для определения структуры и состава РТК необходимы разработка и оптимизация общей и узловой сборки. В состав РТК входят сборочное оборудование и приспособления, транспортная система, операционные сборочные роботы, контрольные роботы, система управления.

При разработке ТП сборки в РТК предпочтительна высокая концентрация операций, определяющая модели роботов, их функции, точность, оперативность, быстроедействие. Особенно важно уточнить временные связи элементов РТК, так как и они могут определить операционные возможности, модели и количество сборочных промышленных роботов (ПР). С этой целью возможно и целесообразно построение циклограммы как отдельных роботизированных рабочих мест и ПР, так и РТК в целом. На основе операционной технологии и цик-

лограм РТК может быть проведена подготовка управляющих программ для сборочных роботов с ЧПУ и для всего РТК.

Перспективным направлением роботизации сборки является использование ПР, построенных по блочно-модульному принципу, а также обучаемых ПР. В системы модулей ПР, как правило, включают модули линейных и угловых перемещений, комплекты переходных элементов для соединения модулей, сменные захватные устройства. На рис. 1.4 приведены схемы системы модулей и компоновок роботов типа

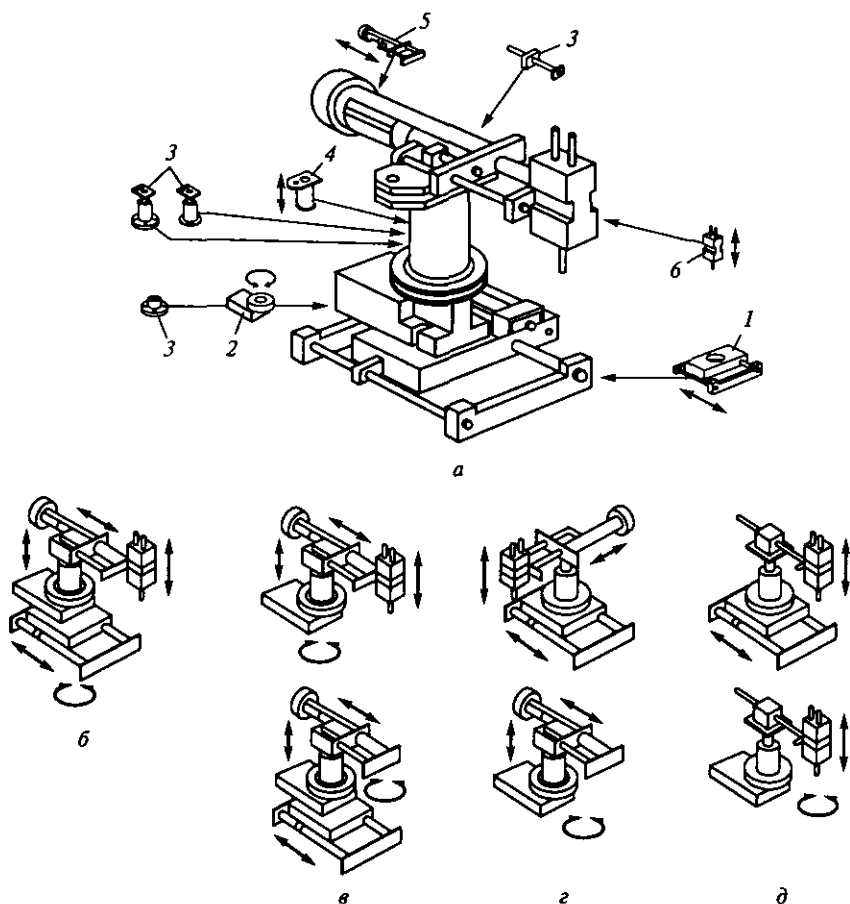


Рис. 1.4. Схемы системы модулей (а) и компоновок с пятью (б), четырьмя (в), тремя (г) и двумя (д) степенями подвижности роботов типа ПР5-2:

1 — линейный модуль МЛ-2; 2 — угловой модуль МУ-13; 3 — комплекты переходных модулей; 4 — линейный модуль МЛ-4; 5 — линейный модуль МЛ-3; 6 — линейный модуль МЛ-7

ПР5-2 с различными степенями свободы. Унификация модулей позволяет существенно увеличить число их модификаций, снизить затраты на автоматизацию сборочного производства.

Обучаемые роботы — это роботы, которые могут приспосабливаться к различным случайным факторам, сопровождающим запрограммированную работу. Эта приспособляемость выражается в корректировке своей же программы на основе полученного «опыта» — результатов анализа и классификации возникающих отклонений и методов их устранения.

1.6. Направления развития машиностроительного производства

Сложившийся тип производственных структур машиностроительных предприятий характеризует ряд признаков:

- отсутствие ярко выраженной технологической специализации машиностроительных производств;
- распыленность технологических ресурсов;
- во многих случаях избыточность или недостаточность мощностей производственных систем;
- отсутствие гибкости производственных систем при переходе предприятия к выпуску новой продукции.

Предметная специализация по предприятиям лежала в основе отрасли. Переход на выпуск принципиально новой продукции в этих условиях требует коренной перестройки с привлечением дополнительных инвестиций, получение которых затруднено.

На смену постоянным организационным структурам промышленных предприятий предметной специализации должна прийти переменная структура на основе так называемой перманентно-изменяющейся матрицы. Промышленное производство представляется как система предприятий корпоративного типа, состоящего из головного предприятия, определяющего вид выпускаемой продукции, и набора технологически специализированных предприятий. Состав и количество таких предприятий определяются видом изготавливаемых изделий. Такая структура легко изменяется в зависимости от запросов рынка. Ее формирование тесно связано с особенностями современного машиностроительного производства:

- формируется сфера информационных технологий инжиниринга, рынка предоставления информационных услуг, которые превращаются в самостоятельную отрасль, имеющую приоритетное значение для развития машиностроения;
- наука становится самостоятельным элементом производительно-

ных сил общества. Растет объем производства наукоемких изделий. Их разработки базируются на опережающих фундаментальных исследованиях, а не на ранее доминирующем эмпирическом подходе к созданию новых изделий;

- в качестве важнейшего фактора развития предприятий выступает конкуренция при регулирующей роли государства;
- происходит реструктуризация предприятий на основе рыночных законов экономики. Структура предприятия обеспечивает выполнение полного жизненного цикла изделий. Корпоративные стремления находят развитие в виде создания виртуальных предприятий;
- индивидуализация заказов, частая смена моделей изделий приводят к повышению трудоемкости технологической подготовки производства и относительному уменьшению трудоемкости самого производства;
- основными показателями эффективности деятельности предприятий становятся: время и надежность сроков выполнения заказов, качество и себестоимость изделий;
- возрастает роль информационных технологий инжиниринга, существенным образом влияющих на все основные показатели экономики предприятия;
- развитие кооперации между предприятиями, расширение рынков сбыта изделий приводят к необходимости создания для производства единой информационной базы.

Таким образом, современный этап развития машиностроения характеризуется необходимостью обеспечения конкурентоспособности производимой продукции, что означает оперативное реагирование производства на изменение потребительского спроса, снижение себестоимости ее выпуска при существенном сокращении сроков выпуска и обеспечение качества. Эта проблема предусматривает решение задачи сокращения времени на ТПП, связанного прежде всего с увеличением номенклатуры выпускаемой продукции при снижении величин партий, что требует создания быстроперенастраиваемых производственных систем (ПС).

В условиях серийного производства ПС ориентированы на возможность выпуска достаточно широкой номенклатуры изделий. Каждая из существующих ПС изначально ориентирована на выпуск определенных видов изделий. При этом приходится говорить о ПС, как о распределенных производственных системах (РПС). Под РПС подразумевают отдельные ПС, организационно не связанные между собой, содержащие в своем составе технологическое оборудование, необходимое для выполнения ТП изготовления конкретного вида заданной для них продукции.

В последнее время скорость организационных перестроек в проектных организациях существенно опережает скорость перестройки на промышленных предприятиях, усиливается конкуренция. Все это остро ставит вопрос разработки методов обеспечения быстрой перестройки и адаптации ПС для выполнения создаваемых проектов, причем выполнение таких проектов должно предусматривать изготовление деталей широкой номенклатуры различного количества.

Изделия с большим объемом выпуска также целесообразно начинать изготавливать на гибком производстве, начиная с малых программ. Это позволит «довести» конструкцию изделия, отработать технологичность оригинальных деталей, ускорит сроки внедрения и наращивания объема выпуска. При этом перевод изготовления деталей с «гибкой» технологии на основную может происходить поэтапно по мере запуска оборудования на отдельных операциях. Высвобождающиеся при этом станки в «гибком» производстве будут задействованы на развитие мощностей оставшихся операций. И так до полного перевода на основное производство.

Появление рынка проектных услуг конструкторскими бюро выдвигает требование формирования ПС, способных реализовать разрабатываемые проекты в короткие сроки при обеспечении заданных параметров. Время жизненного цикла проекта может быть достаточно малым, поэтому проводить физическую перестройку существующих ПС для их реализации оказывается невозможным. Кроме того, при реализации нескольких проектов, а во многих случаях даже одного требуется одновременное изготовление небольшого количества деталей различной номенклатуры. Здесь приходится говорить о многообъектном проектировании и изготовлении, при этом формируемая ПС должна быть объектно-ориентированной.

Формирование ПС традиционными методами, связанными с материальными перестройками существующих ПС, для этих целей оказывается неприемлемым. Возникает необходимость в поиске новых подходов к процессам формирования ПС с требуемыми свойствами без осуществления трудоемких материальных перестроек.

Подходом к решению данной проблемы является обеспечение возможности создания ПС на базе существующих, путем проведения мероприятий, использующих временные (на период жизненного цикла проекта) организационные связи, без трудоемких материальных перестроек. Материальной основой такой ПС является совокупность технологического оборудования РПС в рамках фонда их свободного времени. Ввиду того что при построении такой ПС отсутствуют материальные изменения в РПС, а информация о ее структуре формируется и хранится только в памяти ЭВМ, такая ПС является виртуальной

производственной системой (ВПС), при этом обеспечивается значительное сокращение сроков ее создания.

Информация о параметрах свободных частей РПС может быть представлена в электронном виде и распространена с помощью различных информационных сетей, в частности глобальной сети Internet. В этом случае можно говорить о формировании рынка услуг РПС.

Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит специфика разработки ТП АП?
2. Назовите преимущества стандартизации и унификации изделий, оборудования, технологических процессов.
3. Перечислите основные требования, предъявляемые к технологии сборки в условиях мелкосерийного автоматизированного производства.
4. Назовите основные подходы к проектированию технологии изготовления изделий в АПС.
5. Перечислите основные принципы построения технологии в АПС. Укажите их назначение и пути реализации.
6. Что является основой типизации ТП? Где применяют типовые ТП?
7. Назовите основные направления, которые используют при типизации ТП.
8. Объясните различие классификации деталей в мелко- и крупносерийном производстве.
9. Перечислите критерии оценки технологичности изделий. Для чего проводят отработку конструкций изделий на технологичность?
10. Что является основой построения групповой технологии? Где ее применяют?
11. Приведите примеры использования методов типизации и групповой технологии при обработке типовых деталей.
12. Что такое модульная технология?
13. Перечислите направления развития машиностроительного производства.

Глава 2

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ И СРЕДСТВА ИХ ОСНАЩЕНИЯ

2.1. Технологическое оборудование и принципы построения автоматизированных производственных систем

В зависимости от отрасли и типа производства АПС создают на базе различного оборудования: универсального, агрегатного, специального и специализированного, автоматов, полуавтоматов, обрабатывающих центров, станков с ЧПУ, объединенного гибкими или жесткими транспортными устройствами. Для серийного и мелкосерийного производства характерно применение автоматизированных систем из универсальных и агрегатных станков, обрабатывающих центров, станков с ЧПУ с гибкой связью, предполагающей наличие межоперационных накопителей. Для крупносерийного и массового производства характерно создание АЛ из специальных и специализированных станков, объединенных жесткой связью, которая устанавливается при большой дифференциации технологического процесса, высокой надежности оборудования. Для этих типов производства характерно применение и роторных линий, которые состоят из вращающихся агрегатов (роторов), выполняющих рабочие и транспортные операции соответственно на рабочих и транспортных роторах. Роторные линии бывают с жесткой и с гибкой (с накопителями) связью между роторами. Разрабатываются конструкции переналаживаемых роторов и АЛ из них, что позволит использовать их в переналаживаемом производстве.

Переналадка оборудования в условиях многономенклатурного производства возможна за счет построения АПС по модульно-агрегатному принципу, когда и основное, и вспомогательное оборудование komponуют из типовых модулей, агрегатов, механизмов и пр. Примерами такого оборудования являются агрегатные станки, автоматизированные поточные линии из агрегатных станков, промышленные роботы блочно-модульных конструкций.

По межстаночному транспорту различают следующие АЛ:

- со сквозным транспортом без перестановки изделия;
- с транспортной системой с перестановкой изделия;
- с транспортной системой с накопителями.

По видам компоновки (агрегатирования) различают следующие АЛ:

- однопоточную;
- параллельного агрегатирования;
- многопоточную;
- скомпонованную из роботизированных ячеек.

Такие АЛ получили преимущественное развитие благодаря возможности создания переналаживаемых производств.

Число позиций в АП зависит от степени дифференциации и концентрации, его подсчитывают и выбирают оптимальным с точки зрения получения наибольшей производительности и надежности. Критерием выбора различных компоновок, структуры, состава АЛ с учетом характеристик и функциональной взаимосвязи является в конечном счете производительность и гибкость АЛ.

Высокие темпы технического прогресса требуют такого технического оснащения производства, которое могло бы успевать за техническим прогрессом, т. е. иметь высокую мобильность (возможность выпуска широкой номенклатуры и типов деталей и изделий). Эта характерная черта серийного производства приобретает важную роль в машиностроении и в других отраслях промышленности.

С этой целью создают переналаживаемые производственные системы с автоматизированной переналадкой при производстве изделий произвольной номенклатуры. Организационными уровнями таких систем являются производственный модуль, АЛ, автоматизированный участок (АУ), автоматизированный цех (АЦ).

Производственный модуль (ПМ) — система, состоящая из единицы технологического оборудования, оснащенная автоматизированным устройством программного управления (ПУ) и средствами автоматизации технологического процесса, которая автономно функционирует, и ее можно встраивать в систему более высокого уровня. В модуль может входить станок с ЧПУ или обрабатывающий центр, контрольно-измерительная система, погрузочно-разгрузочная и транспортно-накопительная система с локальным управлением технологической единицы оборудования. Структурные компоненты производственного модуля изображены на рис. 2.1.

Производственная ячейка (ПЯ) — частный случай ПМ — комбинация из элементарных модулей с единой системой измерения, инструментального обеспечения, транспортно-накопительной и погрузочно-разгрузочной системами, с групповым управлением. ПЯ, как и ПМ, можно

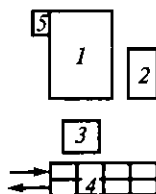


Рис. 2.1. Структурные компоненты ПМ:

1 — станок с ЧПУ; 2 — управляющее устройство; 3 — погрузочно-разгрузочное устройство; 4 — транспортно-накопительное устройство; 5 — контрольно-измерительное устройство

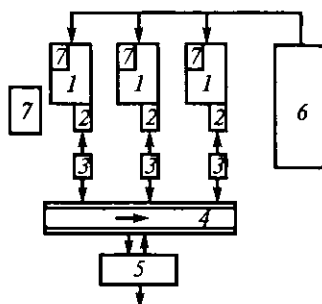


Рис. 2.2. Структурные компоненты гибкой ПЯ:

1 — станок с ЧПУ или обрабатывающий центр; 2 — приемный стол; 3 — погрузочно-разгрузочное устройство; 4, 5 — транспортно-накопительное устройство (4 — конвейер, 5 — накопитель); 6 — управляемая ЭВМ; 7 — контрольно-измерительная система

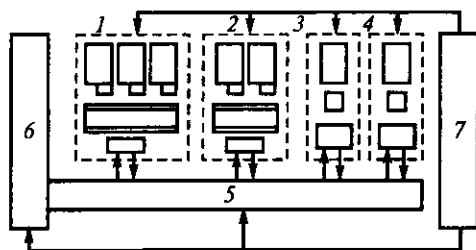


Рис. 2.3. Структурные компоненты гибкой АЛ:

1, 2 — производственные ячейки; 3, 4 — производственные модули; 5 — транспортная система; 6 — склад; 7 — управляющая ЭВМ

встраивать в систему более высокого уровня. Структурные компоненты ПЯ изображены на рис. 2.2.

Автоматизированная линия (АЛ) — переналаживаемая система, состоящая из нескольких ПМ или (и) ПЯ, объединенных единой транспортно-складской системой и системой АСУ ТП. Оборудование АЛ размещают в принятой последовательности технологических операций. Структурные компоненты АЛ изображены на рис. 2.3.

В отличие от АЛ на переналаживаемом *автоматизированном участке (АУ)* предусмотрена возможность изменения последовательности использования технологического оборудования. Как АЛ, так и АУ могут содержать отдельно функционирующие единицы технологического оборудования. Структурные компоненты АУ изображены на рис. 2.4.

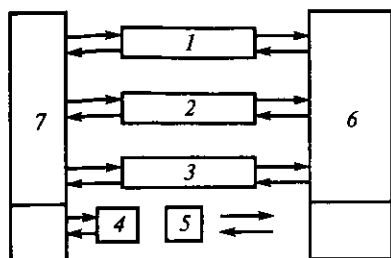


Рис. 2.4. Структурные компоненты АУ:
1 – 3 — АЛ; 4 — ПЯ; 5 — ПМ; 6 — склад;
7 — управляющая ЭВМ

Каждый структурный компонент гибких систем технически представляет собой законченное целое и имеет свою локальную систему управления, что позволяет ему эффективно функционировать как индивидуально, так и в составе переналаживаемого производства и прежде всего в составе *автоматизированного цеха (АЦ)*, состоящего из ПМ, ПЯ, АЛ и АУ, объединенных единой автоматизированной

системой управления (АСУ), предназначенной для изготовления изделий заданной номенклатуры. В состав АЦ могут входить отдельно функционирующие неавтоматизированные участки.

На базе крупных АУ и АЦ можно организовать комплексно-автоматизированное переналаживаемое производство с использованием САПР, автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП), автоматизированных систем управления производством (АСУП), автоматизированных систем научных исследований (АСНИ), автоматических систем контроля и измерения (АСКИО) и других систем, функционирующих на базе современных CALS-технологий.

2.2. Производительность автоматизированных систем

Эффективность автоматизации определяется прежде всего экономической эффективностью, а также взаимосвязью технических и экономических показателей производства. Технические показатели: $t_{p.o}$ — общее время рабочих ходов; t_x — время холостых ходов цикла; q , n_y — число рабочих позиций и участков, на которые разделено автоматизированное производство; временные потери. Экономические показатели: стоимость, срок службы, экономический эффект и пр. Производительность труда и коэффициент его роста являются обобщенными показателями АП. На взаимосвязи технических и экономических показателей АП основана теория производительности труда и машин (ТПТ), на основе которой выбирают наиболее эффективный вариант проекта при необходимости модернизации производства.

Методы расчета и оценки производительности автоматизированных систем

Производительность определяют количеством годных деталей, изделий, комплектов, выпускаемых машиной в единицу времени. Время

обработки детали машиной является обратной величиной производительности.

При расчете, анализе и оценке производительности автоматизированного оборудования с учетом различных видов затрат времени используют четыре вида (или категории) производительности: технологическую, цикловую, техническую и фактическую.

Технологическая производительность — максимальная теоретическая производительность при условии бесперебойной работы машины и обеспечении ее всем необходимым

$$K = 1/t_p, \quad (2.1)$$

откуда $t_p = 1/K$ — время рабочих ходов.

Цикловая производительность — теоретическая производительность машины с реальными холостыми и вспомогательными ходами ($t_x > 0$; $t_{всп} > 0$) и при отсутствии простоев ($\Sigma t_{пр} = 0$):

$$Q_u = 1/T = \frac{1}{t_p + t_x + t_{всп}}, \quad (2.2)$$

где $t_{всп}$ — вспомогательное время на загрузку-разгрузку оборудования, смену инструмента по циклу; t_x — время холостых ходов.

В автоматах и АЛ непрерывного действия (при $t_x = 0$) цикловая производительность равна технологической. В остальных случаях она меньше и при $t_{всп} = 0$ определяется по формуле

$$Q_u = \frac{1}{t_p + t_x} = \frac{1}{1/K + t_x} = K \frac{1}{1 + K t_x} = K \eta. \quad (2.3)$$

Величину $\eta = \frac{1}{1 + K t_x}$ называют коэффициентом производительности. Она характеризует степень непрерывности протекания технологического процесса. Так, $\eta = 0,8$ означает, что в рабочем цикле 80 % составляют рабочие ходы, а остальные 20 % — холостые, и, следовательно, возможности технологического процесса используются только на 80 %.

Техническая производительность — теоретическая производительность машины с реальными холостыми ходами и учетом ее собственных простоев Σt_c , связанных с выходом из строя инструментов, приспособлений, оборудования (т.е. при условии: $t_x > 0$; $t_{всп} > 0$; $\Sigma t_c > 0$):

$$Q_r = \frac{1}{(t_p + t_x + t_{всп}) + \Sigma t_c}. \quad (2.4)$$

Фактическая производительность — минимальная производительность, учитывающая все виды потерь:

$$Q_{\phi} = \frac{1}{T + \Sigma t_{\text{пр}}} = \frac{1}{(t_p + t_x + t_{\text{всп}}) + (\Sigma t_c + \Sigma t_{\text{орг}} + \Sigma t_{\text{пер}})}, \quad (2.5)$$

где $\Sigma t_{\text{пр}} = (\Sigma t_c + \Sigma t_{\text{орг}} + \Sigma t_{\text{пер}})$ — суммарное время всех простоев; $\Sigma t_{\text{орг}}$ — время простоев по организационно-техническим причинам, не связанным с работой оборудования; $\Sigma t_{\text{пер}}$ — суммарное время переналадок оборудования.

Для количественной оценки фактической производительности необходимо общее количество деталей z разделить на период их изготовления θ :

$$Q_{\phi} = \frac{z}{\theta}.$$

Если за рабочий цикл изготавливается одна деталь, то

$$z = \frac{\theta_p}{T}.$$

При выпуске p деталей

$$z = p \frac{\theta_p}{T}.$$

Чем чаще и длительнее простои, тем ниже производительность. Влияние внецикловых простоев на производительность можно оценить по ряду показателей и коэффициентов:

- коэффициент использования $\eta_{\text{исп}}$;
- коэффициент технического использования $\eta_{\text{тех}}$;
- коэффициент загрузки $\eta_{\text{зар}}$;
- показатель Σt_n — величина внецикловых простоев, приходящихся на одну деталь

$$\Sigma t_n = \Sigma \theta_{\text{пр}} / z ;$$

- показатель ΣB — величина внецикловых простоев, приходящихся на единицу бесперебойной работы

$$\Sigma B = \Sigma \theta_{\text{пр}} / \theta_p,$$

где $\Sigma \theta_{\text{пр}}$ — суммарное время простоев; θ_p — суммарное время безотказной работы.

Показатели Σt_n и ΣB связаны соотношением

$$\Sigma t_n \frac{\Sigma \theta_{\text{пр}}}{z} = \frac{\Sigma \theta_{\text{пр}}}{\theta_p / T} = \frac{\Sigma \theta_{\text{пр}}}{\theta_p} T = \Sigma B T, \quad (2.6)$$

откуда

$$\Sigma B = \frac{\Sigma t_n}{T} = \frac{\Sigma t_c + \Sigma t_{исп}}{T}. \quad (2.7)$$

Коэффициент использования численно равен доле времени работы машины θ_p в общем плановом фонде времени $\theta_{пл}$:

$$\eta_{исп} = \frac{\theta_p}{\theta_{пл}} = \frac{\theta_p}{\theta_p + \Sigma \theta_{пр}} = \frac{1}{1 + (\Sigma \theta_{пр} / \theta_p)} = \frac{1}{1 + \Sigma B}. \quad (2.8)$$

Фактическую производительность Q_ϕ и коэффициент использования $\eta_{исп}$ можно выразить через время цикла T и суммарное время простоев Σt_n следующим образом:

$$\eta_{исп} = \frac{1}{1 + \Sigma B} = \frac{1}{1 + (\Sigma t_n / T)}, \quad (2.9)$$

$$Q_\phi = Q_u \eta_{исп} h = \frac{1}{T} \frac{1}{1 + \Sigma B} = \frac{1}{T(1 + \Sigma B)}. \quad (2.10)$$

Коэффициент технического использования $\eta_{тех}$ численно равен доле времени работы машины при условии обеспечения ее всем необходимым (т.е. в периоды, исключаяющие организационные простои $\Sigma \theta_{орг}$):

$$\eta_{тех} = \frac{1}{1 + (\Sigma \theta_c / \theta_p)} = \frac{1}{1 + (\Sigma t_c / T)}, \quad (2.11)$$

где $\Sigma \theta_c$ — суммарные собственные простои за некоторый период времени θ ; θ_p — суммарное время работы за тот же период времени; Σt_c — собственные внецикловые потери.

Производительность машины с учетом только собственных потерь (техническая производительность)

$$Q_t = Q_u \eta_{тех} = \frac{1}{T} \eta_{тех} = \frac{1}{T} \frac{1}{1 + (\Sigma t_c / T)} = \frac{1}{T + \Sigma t_c}. \quad (2.12)$$

Коэффициент загрузки показывает, какую долю времени машина обеспечена всем необходимым. Так, значения $\eta_{тех} = 0,7$ и $\eta_{заг} = 0,8$ означают, что в общем фонде времени машина обеспечена всем необходимым для бесперебойной работы (заготовками, инструментом, электроэнергией и т. п.) только на 80 % времени и в этот период она работает только 70% (остальное время простаивает по техническим причинам: из-за отказов, смены инструментов, наладок и др.). Коэффициент ис-

пользования $\eta_{\text{исп}}$ и коэффициенты $\eta_{\text{тех}}$ и $\eta_{\text{заг}}$ связаны следующим соотношением:

$$\eta_{\text{исп}} = \eta_{\text{тех}} \eta_{\text{заг}}.$$

Например, при $\eta_{\text{тех}} = 0,7$ и $\eta_{\text{заг}} = 0,8$ коэффициент использования $\eta_{\text{исп}} = \eta_{\text{тех}} \eta_{\text{заг}} = 0,7 \cdot 0,8 = 0,56$.

Таким образом, все категории (виды) производительности (K , $Q_{\text{ц}}$, $Q_{\text{т}}$, Q_{ϕ}) связаны между собой безразмерными коэффициентами η , $\eta_{\text{исп}}$, $\eta_{\text{тех}}$, $\eta_{\text{заг}}$ следующими соотношениями:

$$K = 1/t_p;$$

$$Q_{\text{ц}} = K\eta;$$

$$Q_{\text{т}} = Q_{\text{ц}} \eta_{\text{тех}} = K\eta \eta_{\text{тех}};$$

$$Q_{\phi} = Q_{\text{ц}} \eta_{\text{исп}} = K\eta \eta_{\text{тех}} \eta_{\text{заг}};$$

$$K > Q_{\text{ц}} > Q_{\text{т}} > Q_{\phi}.$$

Все показатели и коэффициенты производительности в общем случае являются функциями времени и изменяются в процессе эксплуатации машин в результате действия различных факторов (износа, старения, коррозии, коробления, вибраций, разрегулирования, повреждений, поломок и др.). На рис. 2.5 показаны типовые зависимости изменения коэффициента использования $\eta_{\text{исп}}$ и коэффициента технического использования $\eta_{\text{тех}}$ в процессе эксплуатации машин.

Величина $\eta_{\text{исп}}$ в каждый момент определяется отношением требуемой производительности к цикловой и монотонно растет пропорционально производственной программе. Величина $\eta_{\text{тех}}$ изменяется по более сложному закону в соответствии с основными периодами эксплуатации автоматов или АПС.

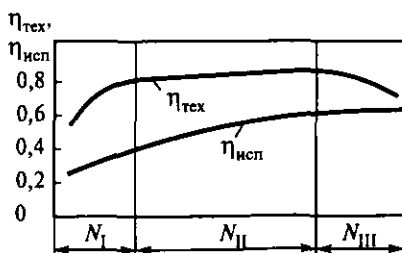


Рис. 2.5. Изменение показателей оборудования в процессе эксплуатации:

N_I — период пуска и освоения; N_{II} — период стабильной эксплуатации; N_{III} — период проявления износа

Анализ производительности действующих автоматизированных систем

Чтобы определить фактическую производительность, необходимо изучить и учесть потери времени по инструменту и оборудованию, организационно-технические потери (т. е. все внецикловые потери) и построить баланс производительности автомата или автоматизированной системы.

Решать эту задачу необходимо поэтапно в такой последовательности.

1. Анализ и расчет характеристик рабочего цикла и его составляющих — t_p , t_x , $t_{всп}$.

2. Проведение эксплуатационных наблюдений за работой оборудования продолжительностью не менее 10–12 рабочих смен, в течение которых фиксируют все элементы затрат времени оборудования: работу, простои и их виды, продолжительность, причины возникновения и способы их устранения, число обработанных деталей по всем типам и т. д.

3. Первичная обработка результатов наблюдений, составление сводной таблицы работы и простоев по всем объектам и рабочим сменам наблюдения с распределением общего времени по видам (состояниям). При этом общее время наблюдений принимается равным 100 %.

4. Расчет показателей работоспособности по характеристикам рабочего цикла: Σt_p , $\Sigma t_{орг}$, $\Sigma t_{пер}$, $\eta_{исп}$, $\eta_{тех}$, η .

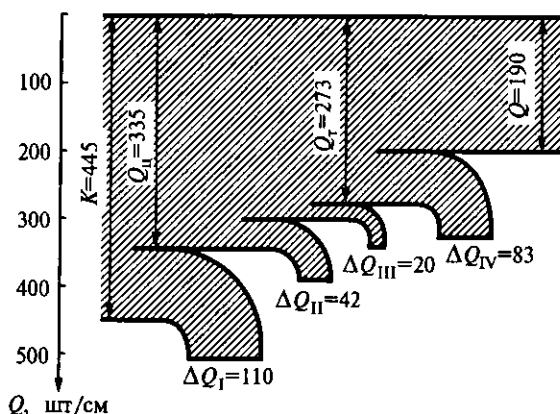


Рис. 2.6. Баланс производительности на примере АЛ
обработки блока цилиндров:

ΔQ_I — потери на холостые ходы и вспомогательные движения (разгрузка-загрузка оборудования, смена инструмента); Q_{II} — потери по инструменту; Q_{III} — потери по оборудованию; Q_{IV} — потери по организационно-техническим причинам

5. Расчет реальной производительности по всем категориям, характеристикам рабочего цикла и баланса затрат фонда времени: K, Q_w, Q_r, Q_b .

6. Построение баланса производительности автоматизированной системы (рис. 2.6).

Баланс производительности отражает реальное соотношение цикловых и внецикловых потерь, позволяет выделить максимальные потери и тем самым определить пути повышения производительности автоматизированного оборудования.

Баланс производительности можно использовать для оценки перспективности различных технических решений, определения исходных данных для расчета и проектирования нового оборудования аналогичного назначения.

Производительность АЛ с различным агрегатированием

На однопоточных линиях последовательного агрегатирования концентрируют разноименные операции ТП, последовательно выполняемые для каждого изделия. Такие линии могут иметь жесткую межагрегатную связь без межоперационных накопителей заделов или гибкую связь с установкой таких накопителей.

Техническая производительность линии с жесткой связью

$$Q_{т1} = \frac{1}{t_p + t_x + t_{всп} + t_c}, \quad (2.13)$$

где t_p — время рабочих ходов цикла, определяемое длительностью обработки на лимитирующей позиции. При равномерной дифференциации технологического процесса

$$t_p = t_{p.o} / q.$$

Здесь $t_{p.o}$ — общее время обработки изделия (суммарное время рабочих ходов); q — число позиций в линии; $t_{всп}$ — вспомогательное время, учитывающее межстаночное транспортирование изделий.

Производительность, выраженная через время цикла T и коэффициент технического использования

$$Q_{т1} = \frac{1}{T} \eta_{тех} = \frac{1}{T} \frac{1}{1 + Bq}, \quad (2.14)$$

где $B = \frac{t_c}{T}$ — внецикловые потери одного станка, отнесенные к единице времени безотказной работы.

Деление АЛ на участки путем установки межоперационных накопителей заделов позволяет локализовать влияние отказов на отдель-

ных позициях. Если АЛ делится на участки-секции по методу равных потерь, то при полной компенсации потерь соседних участков коэффициент использования

$$\eta_{\text{исп}} = \frac{1}{1 + (Bq/n_y)} \quad (2.15)$$

Здесь n_y — число участков в линии.

Так как полная компенсация потерь возможна лишь теоретически при бесконечной емкости накопителей, то в реальных условиях каждый участок линии простаивает не только из-за собственных причин, но и вследствие некомпенсированных простоев соседних участков. В этом случае

$$\eta_{\text{исп}} = \frac{1}{1 + (Bq/n_y)W}, \quad (2.16)$$

где W — коэффициент возрастания внецикловых потерь i -го участка из-за неполной компенсации потерь накопителей на границах участков ($W > 1$).

В АЛ параллельного агрегатирования концентрируют одноименные операции дифференцированного технологического процесса, выполняемые на p изделиях. За время рабочего цикла T выдается p изделий, следовательно, цикловая производительность таких линий

$$Q_{\text{ц2}} = \frac{p}{T} = \frac{p}{t_p + t_{\text{а}} + t_{\text{всп}}}. \quad (2.17)$$

Если все встроенные в линию однопозиционные автоматы работают независимо, то, пренебрегая потерями общей транспортной системы, можно определить техническую производительность АЛ:

$$Q_{\tau 2} = \frac{p}{T + t_c}, \quad (2.18)$$

где t_c — собственные простои одного автомата в составе АЛ.

При $p \rightarrow \infty$ производительность стремится к некоторому пределу $Q_{\tau 2 \text{ max}}$, который определяется собственными простоями оборудования

$$Q_{\tau 2 \text{ max}} = \lim_{p \rightarrow \infty} Q_{\tau 2} = 1/t_c.$$

В АЛ последовательно-параллельного действия концентрируют как одноименные, так и разноименные операции. Их конструктивным отличием является наличие ($p \geq 2$) параллельных потоков обработки, в каждом из которых деталь последовательно проходит через q рабочих позиций. В условиях массового производства используют две основные модификации этих линий:

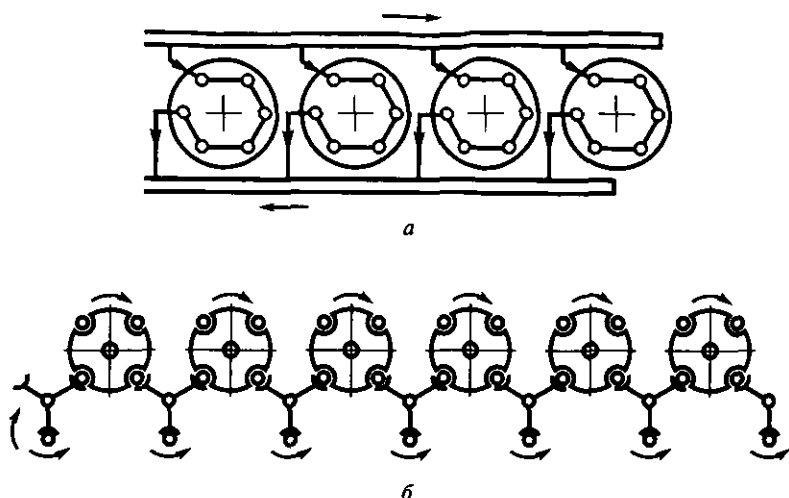


Рис. 2.7. Структурно-компоновочные варианты АЛ последовательно-параллельного действия:

a — линия из автоматов последовательного действия, работающих параллельно; *б* — линия из автоматов параллельного действия, работающих последовательно (роторная линия)

- линии из автоматов дискретного последовательного действия, работающих параллельно (рис. 2.7, *a*);
- линии из автоматов параллельного действия, работающих последовательно (роторные и роторно-конвейерные линии, рис. 2.7, *б*).

Для линий первой модификации техническая производительность

$$Q_{\text{тз}} = \frac{P}{t_{\text{р.о}} / q + t_x + t_{\text{всп}} + t_c q} = \frac{P}{T + t_c q}. \quad (2.19)$$

Для линий второй модификации техническая производительность

$$Q_{\text{тз}} = \frac{P}{t_{\text{р.о}} / q + t_x + t_{\text{всп}} + t_c qp} = \frac{P}{T + t_c qp}. \quad (2.20)$$

Если многопоточная АЛ разделена на участки-секции по методу равных потерь, то расчет производительности целесообразно производить по выпускному участку

$$Q_{\text{тз}} = \frac{p}{T} \frac{1}{1 + B(q/n_y)W}, \quad (2.21)$$

где p — число потоков выпускного участка; T — длительность рабочего цикла выпускного участка; W — коэффициент возрастания простоев

выпускного участка из-за неполной компенсации отказов предыдущих участков; q — число рабочих позиций на выпускном участке; n — число участков в линии; B — внецикловые потери одной рабочей позиции.

Особенности расчета производительности в массовом и серийном производстве

Для автоматизированных систем, работающих без переналадок в условиях массового производства, величина всех определяющих факторов (технологических режимов, перемещений и др.) либо постоянна в процессе функционирования ($T = \text{const}$), либо является математическим ожиданием случайной величины в стабильных условиях эксплуатации (Σt). Простои и потери времени на переналадку здесь отсутствуют ($\Sigma \theta_{\text{пер}} = 0$, $\Sigma t_{\text{пер}} = 0$). Технологическая производительность определяется лишь длительностью рабочего цикла и надежностью в работе. При решении задач анализа и синтеза автоматических линий в условиях массового производства величины t_p , t_x , t_c выражают функционально через параметры машин и их систем (число позиций и потоков изготавливаемых деталей, технологические режимы, тип системы управления и транспортной системы, структурная схема линии и др.).

При оценке производительности автоматизированных систем в условиях серийного производства необходимо учитывать все составляющие затрат времени: потери на переналадку ($\Sigma t_{\text{пер}} \neq 0$) и вспомогательное время ($\Sigma t_{\text{всп}} \neq 0$).

Продолжительность рабочих ходов теряет свою определенность, так как длительность обработки поверхностей различных деталей неодинакова, поэтому фактическая производительность машин в условиях серийного производства

$$Q_{\Phi} = \frac{1}{T + \frac{\Sigma \theta_c + \Sigma \theta_{\text{орг}} + \Sigma \theta_{\text{пер}}}{z}} = \frac{1}{T + \Sigma t_c + \Sigma t_{\text{орг}} + \Sigma t_{\text{пер}}} = \frac{1}{T + \Sigma t_{\pi}}, \quad (2.22)$$

где Σt_c , $\Sigma t_{\text{орг}}$, $\Sigma t_{\text{пер}}$ — потери времени собственные, организационно-технические и из-за переналадки, отнесенные к единице выпущенной продукции; z — количество изготавливаемых деталей в партии.

Для решения задач анализа и синтеза машин в условиях серийного производства необходимо иметь показатели производительности в зависимости от ряда определяющих факторов: характеристики комплекта изготавливаемых деталей, их сложности, станкоемкости обработки поверхностей деталей, технологических режимов, характеристики самих

станков, мобильности переналадки, степени загрузки оборудования, величины партии изготавливаемых деталей между переналадками и др.

**Связь производительности с надежностью.
Методы повышения производительности и надежности
автоматизированных систем**

Производительность машины находится в прямой зависимости от показателей надежности. Чем больше наработка на отказ, чем меньше интенсивность отказов, тем меньше простоев оборудования и выше производительность и коэффициент использования системы.

Чем больше $\Delta Q = Q_u - Q_r$, тем ниже надежность производственной системы, что приводит не только к низкой производительности, но и к увеличению эксплуатационных расходов. Зависимости производительности Q от частоты отказов ω для разных значений длительности цикла T_i приведены на рис. 2.8. Как следует из рисунка, особенно сильно частота отказов влияет на производительность машин при коротких циклах, что характерно для многопозиционных автоматов и автоматических линий.

Статистическое изучение работы оборудования имеет важное значение при анализе факторов, влияющих на надежность и долговечность. Помогает в этом диагностика состояния станков, приспособлений, инструмента и систем управления. Например, повышение надежности машин достигается своевременной сменой инструмента, наблюдением за состоянием инструмента в работе, определением рациональных режимов резания лимитирующих инструментов.

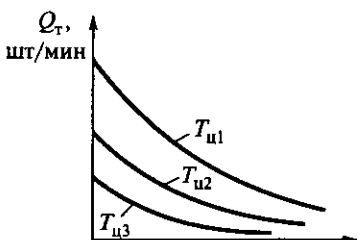


Рис. 2.8. Зависимость технической производительности Q_T от частоты отказов на цикл ω_c при разных длительностях цикла ($T_{ц1} < T_{ц2} < T_{ц3}$)

В результате диагностики состояния подвижных стыков и перемещений в них можно применять различные методы компенсации износа, тепловых и упругих деформаций, которые ведут к потере точности и выходу машины из строя. Эффективным способом повышения общей надежности систем является резервирование их наиболее ненадежных элементов. В частности, дублирование элементов управления повышает надежность систем информации и управления.

Таким образом, основными направлениями повышения надежности и, как следствие, производительности автоматизированных производственных комплексов являются:

Таким образом, основными направлениями повышения надежности и, как следствие, производительности автоматизированных производственных комплексов являются:

1) повышение надежности работы станков, роботов, транспортно-складских систем, из которых комплектуется комплекс;

2) повышение надежности всего комплекса за счет выбора рациональной компоновки и системы управления.

2.3 Выбор технологического оборудования и промышленных роботов в автоматизированном производстве

Выбор технических средств для автоматизированного производства — один из важнейших этапов, определяющих структурно-компоновочные решения, организационные и технологические возможности, эксплуатационные расходы и другие показатели производства.

Исходной информацией для выбора оборудования и ПР являются сведения об изготавливаемых деталях и организационно-технологических условиях их изготовления. Подбор и группирование деталей для изготовления на автоматизированном участке производят с учетом следующих характеристик:

1) конструктивно-технологического подобия деталей, т. е. сходства по габаритным размерам, массе, конфигурации, характеру конструктивных элементов, требованиям к точности обработки и качеству обрабатываемых поверхностей, числу обрабатываемых поверхностей;

2) максимальной степени завершенности маршрута обработки деталей на автоматизированном участке — без прерывания маршрута обработки для выполнения каких-либо специфических операций (термообработки, доводки и др.);

3) подобия используемой оснастки и инструментов;

4) наличия у деталей четко выраженных признаков ориентации, однородных по форме и расположению поверхностей для базирования в приспособлениях-спутниках или захвата захватными устройствами ПР.

Подобранная группа деталей с учетом годовой программы выпуска, размера и частоты повторяемости каждого типоразмера, числа переналадок должна обеспечить загрузку оборудования при двух- или трехсменной работе.

На основе подобранной группы деталей с учетом видов обработки и трудоемкости выбирают типаж требуемого оборудования, приспособлений, ПР, характер и маршрут транспортирования деталей. На этом этапе определяют компоновку автоматизированного производственного участка, проводят расчет вместимости автоматизированного склада, числа спутников, оптимизацию пространственного расположения оборудования.

Ввиду многовариантности структурно-компоновочных решений

проектируемого производственного участка многие его параметры целесообразно рассчитывать на ЭВМ. Автоматизированные производственные системы относятся к большим техническим системам, характеризующимся наличием взаимосвязанных объектов, сложной связью информационных и материальных потоков, возникновением в процессе работы различных случайных воздействий. Расчет на ЭВМ методом имитационного моделирования дает возможность получить основные характеристики различных компоновок производственных систем с учетом всех возможных случайных производственных ситуаций.

Для определения состава оборудования, включаемого в автоматизированные переналаживаемые системы, необходима показательная проработка ТП *всех* деталей, обрабатываемых в системе. В первую очередь разрабатывают ТП на деталь, имеющую наибольшее число обрабатываемых поверхностей. При этом намечают первоначальную специализацию оборудования и выявляют необходимые технологические характеристики для оборудования с ЧПУ. Технологические процессы для остальных деталей группы строят в соответствии с принятым типовым маршрутом и с учетом намеченной специализации оборудования.

Исходя из разработанных ТП выявляют технологические характеристики станков, на основании которых производят подбор станков из имеющегося парка (в соответствии с каталогом станков с ЧПУ) или разрабатывают и используют специализированное оборудование.

В зависимости от методов изготовления изделий в качестве основного технологического оборудования можно использовать: литейные машины и установки (например, для литья под давлением); молоты и прессы дляковки и объемной штамповки; штампы и прессы для листовой штамповки; прокатные станы; металлорежущие станки; станки для электрофизической, электрохимической и лазерной обработки; оборудование для обработки поверхностным пластическим деформированием; оборудование для термообработки (печи, ванны, нагревательные и закалочные установки); оборудование для нанесения покрытий (например, гальванические ванны, окрасочные камеры); сборочное оборудование (например, сборочные автоматы и промышленные роботы). Так как наиболее распространенным методом изготовления изделий в машиностроении является обработка резанием, то наибольшее применение находят металлорежущие станки.

При подборе станков необходимо учитывать возможность их встройки в АПС. Для этого у них должны быть однотипные автоматические устройства для загрузки и закрепления спутников, одинаковые устройства ЧПУ и достаточная вместимость магазинов инструментов. Таким образом, в состав АПС включают станки с ЧПУ, параметры которых обеспечивают реализацию ТП обработки опре-

деленной группы деталей. Туда же могут встраиваться и универсальные станки или специализированное оборудование, не оснащенное ЧПУ, а также станки без устройств для автоматической загрузки деталей.

Необходимое количество основного оборудования проектируемого участка подсчитывают отдельно по номенклатуре и каждому типоразмеру с учетом затрат времени ($T_{шт}$) по отдельным операциям технологического процесса, выполняемого на данном оборудовании, программы и номенклатуры выпускаемых деталей или изделий.

Выбор основного технологического оборудования

Анализ многообразия деталей, подлежащих автоматизированной обработке, и известных АУ показывает, что можно выделить два основных типа производственных участков (отличающихся оборудованием, средствами автоматического транспортирования, структурно-компоновочными решениями): автоматизированные участки для изготовления деталей типа тел вращения (валов, дисков, фланцев, шестерен) и корпусных деталей.

Технологический маршрут изготовления деталей типа тел вращения обычно состоит из предварительной или окончательной токарной обработки, сверлильно-фрезерных операций, термообработки и шлифования. Для автоматизированного изготовления таких деталей неприемлем способ закрепления их в приспособлениях-спутниках. Это связано с тем, что детали типа тел вращения при обработке закрепляются в патронах и получают вращение вокруг оси. Поэтому основной путь автоматизации процесса изготовления деталей типа тел вращения — использование станков с ЧПУ и промышленных роботов. Заготовки располагают на призмах или пазах в накопителях без жесткого закрепления.

Выбор токарных станков с ЧПУ производят в зависимости от габаритных размеров и массы заготовок с корректировкой на точностные возможности оборудования (табл. 2.1 и 2.2).

Фрезерные, сверлильные, протяжные, зубообрабатывающие, шлифовальные станки дополняют токарные и их выбирают в зависимости от технологических маршрутов изготовления группы деталей.

Совместить токарную обработку с фрезерованием, сверлением, растачиванием деталей типа тел вращения позволяют токарные многоцелевые станки (табл. 2.3).

Автоматизированные участки для обработки корпусных деталей в основном состоят из многооперационных станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр», объединенных системой автоматической транспортировки деталей с автоматизированным складом. В автоматизи-

Таблица 2.1

**Рекомендуемые модели станков с ЧПУ
для автоматизированной обработки деталей типа валов**

Максимальные параметры заготовки			Высота оси центров станка, мм		Модель станка
диаметр, мм	длина, мм	масса, кг	над станиной	над суппортом	
20	250	2	250	125	ИИ611ПМФ3, 1П717Ф3
50	500	10	320	200	16Б16Т1, 1713Ф3, 16Б16Ф3
80	1000	40	400	250	16К20Т1, 1720ПФ3, 16К20Ф3
160	1400	160	630	400	16К30Ф3, 1740РФ3, 1Б732Ф3

Таблица 2.2

**Рекомендуемые модели станков с ЧПУ
для автоматизированной обработки деталей типа дисков**

Максимальные параметры заготовки			Модель станка
диаметр, мм	длина, мм	масса, кг	
160	100	10	1П717Ф3, 1П420ПФ40, 11Б40ПФ4
250	200	40	16Б16Т1, 16К20Ф3, 1720ПФ30
320	250	80	16К20Т1, 16К20Ф3, 1740РФ3
400	320	160	1П752МФ3, 1П756ДФ3, 1П717Ф3

Таблица 2.3

**Рекомендуемые модели токарных многоцелевых станков
для автоматизированной обработки деталей типа тел вращения**

Максимальные параметры заготовки			Модель станка
диаметр, мм	длина, мм	масса, кг	
200	160	40	ИРТ180ПМФ4
220	500	150	СТМ220К
320	450	300	СТМ320К
400	1500	1500	1740РФ4
450	630	800	СТМ450
560	1000	1900	1757Ф4

**Рекомендуемые модели многоцелевых станков с ЧПУ
для автоматизированной обработки корпусных деталей**

Максимальные параметры заготовки				Станок	
длина, мм	ширина, мм	высота, мм	масса, кг	модель	тип
200	200	320	60	ИР200ПМФ4	Многоцелевой горизонтальный
320	250	320	100	6902ПМФ2	Горизонтально-фрезерный с ЧПУ
320	320	400	150	ИР320ПМФ4	Многоцелевой горизонтальный
400	500	500	300	2204ВМФ4	То же
400	630	500	300	2254ВМФ4	Многоцелевой вертикальный
400	900	450	400	400V	То же
400	1600	250	400	ГФ2171С6	»
500	400	500	300	6904ВМФ4	Горизонтально-фрезерный с ЧПУ
500	500	500	700	ИР500ПМФ4	Многоцелевой горизонтальный
500	500	800	800	ИС500ПМФ4	То же
500	630	500	400	ГДВ500	Многоцелевой вертикальный
500	1000	750	700	2С150ПМФ4	То же
630	630	630	600	Суперцентр 630	Многоцелевой горизонтальный
600	1250	600	800	600V	Многоцелевой вертикальный
630	800	800	800	2206ВМФ4	Многоцелевой горизонтальный
800	630	630	500	6906ВМФ2	Горизонтально-фрезерный с ЧПУ
800	800	800	1500	ИР800ПМФ4	Многоцелевой горизонтальный
800	800	800	2000	ИС800ПМФ4	То же

рованных участках также используют координатно-измерительные, моечные машины и другое дополнительное оборудование.

Конструктивно-технологические характеристики корпусных деталей и рекомендуемые модели серийно изготавливаемых многооперационных станков с ЧПУ приведены в табл. 2.4.

При большой программе выпуска деталей в АУ используют станки с ЧПУ со сменными многошпиндельными головками. Такие станки собирают из комплекта унифицированных узлов, включающего станину, силовой стол, привод главного движения, магазин сменных многошпиндельных головок. Многошпиндельные головки содержат несколько инструментов, которые за одну рабочую подачу одновременно производят обработку детали.

Корпусные детали в основном закрепляются в одноместных или многоместных приспособлениях-спутниках и транспортируются с помощью рольгангов или конвейеров между станками и автоматическим складом. Промышленные роботы для транспортирования корпусных деталей используют редко, только в случаях, когда корпусные детали имеют небольшие габаритные размеры и развитые базы.

Приспособления-спутники имеют форму прямоугольной плиты, на верхней части которой закрепляются обрабатываемые детали, а нижняя часть имеет специальные пазы и отверстия для базирования на накопителях, транспортных средствах или рабочих столах станков. Таким образом, приспособления-спутники имеют функцию не только станочных приспособлений, но и приспособлений для транспортирования и хранения деталей на складе.

Выбор промышленных роботов для обслуживания технологического оборудования

Промышленные роботы чаще всего применяют для автоматизации загрузки-выгрузки изделий на технологическое оборудование, хотя они могут выполнять также смену инструмента и контроль изделий на оборудовании. Применение ПР выравнивает и стабилизирует работу оборудования, повышает загрузку оборудования, обеспечивает гибкость (быструю переналадку) при смене изделия, улучшает условия труда в автоматизированном производстве. Промышленные роботы должны обладать:

- достаточным техническим уровнем для обслуживания сложного технологического оборудования;
- соответствующими техническими характеристиками (грузоподъемность, скорость срабатывания, точность позиционирования, тип программного устройства);
- стыкуемостью с обслуживаемым оборудованием по всем параметрам;
- высокой надежностью, достаточной универсальностью, малым временем переналадки;
- возможностью повышения технико-экономических показателей обработки (низкий уровень брака, высокая производительность).

При выборе ПР необходимо учитывать:

- соответствие массы манипулируемого объекта грузоподъемности ПР;
- соответствие зоны, в которой должно проводиться манипулирование, рабочей зоне робота;

- соответствие траектории, скорости и точности движений кинематическим и точностным возможностям ПР;
- возможность захватывания детали захватным устройством;
- возможность построения траектории перемещения схвата робота между заданными точками в рабочей зоне.

Для автоматизированного участка целесообразно использовать группу однотипных ПР, что упрощает их обслуживание и наладку.

При выборе ПР можно руководствоваться рекомендациями, приведенными в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Промышленные роботы и обслуживаемое технологическое оборудование, рекомендуемые для роботизированных ячеек механообработки тел вращения

Модель ПР	Грузоподъемность, кг	Параметры						Обслуживаемое технологическое оборудование
		Вертикальный ход, мм	Горизонтальный ход, мм	Поворот, град	Скорость линейная, м/с	Скорость угловая, град/с	Погрешность позиционирования, ±мм	
МП-9С	0,2	30	180	120	0,5	180	0,05	ТПК-125, 1И611ПФ3, 1П717Ф3
РФ-202М	0,2/0,2	30	200	120	0,8	180	0,1	ТПК-125, 1И611ПФ3, 1П717Ф3
РФ-204М РФ-205М	0,5/0,5	30	200	120	0,7	180	0,5	ТПК-125, 1И611ПФ3, 16Б16Ф3
РФ-1001С	1,0	400	500	250	0,5	60	0,5	6Н13Ф3, 1П717Ф3, 1И611ПФ3
«Циклон-5.01»	5/5	100	850	270	1,5	180	0,1	ЛФ-220ПФ3, ЛФ-320ПФ3, 6520МФ3, МР-71, 3М151Ф2
М-31 (М-21)	5/5	600	1000	90	0,7	120	0,5	ТПК-125, 1И611ПФ3, 16Б05ВФ3, 16Б16Ф3

Модель ПР	Грузоподъемность, кг	Параметры						Обслуживаемое технологическое оборудование
		Вертикальный ход, мм	Горизонтальный ход, мм	Поворот, град	Скорость линейная, м/с	Скорость угловая, град/с	Погрешность позиционирования, ±мм	
ПР-4	5	150	600	240	0,7	100	0,5	1А616Ф3, 1713Ф3, 6Н82
«Универсал-5»	5	800	700	240	0,8	120	1,0	МР-76, ВТ-53, 1Е61МФ2, 1А616С
«Бриг-10Б»	10	100	600	270	0,7	120	0,5	КТ-141, КТ-142, 1А240П-6, 1П752МФ3
МП-5	15	250	600	180	0,8	90	0,5	1734П, 1713
МП-8	15	250	800	270	0,5	120	1,0	16Б16Ф3, 16К20ПФ3, 16К20Т1, 1П752МФ3
М20П	20	500	500	300	0,5	60	1,0	16К20Ф3, 6902ПМФ3, 16К20Т1
7607	25	300	700	340	0,7	180	1,0	16К20ПФ3, 16К20Т1, 6902ПМФ3
ПР-25	25	1000	1750	320	0,8	180	1,0	16К20ПФ3, 16К20Т1, 6902ПМФ3,
РПМ-25.02	25	1000	1750	350	0,8	180	1,0	16К20ПФ3, 16К20Т1, 1П752МФ3, 6904ВМФ3
СМ40Ц4301	40	760	760	270	0,5	90	1,5	16К20Ф3, МР-71М, 1П735ПФ3, 2Р135Ф2, 6Р13Ф3, 6902ПМФ3

Модель ПР	Грузоподъемность, кг	Параметры						Обслуживаемое технологическое оборудование
		Вертикальный ход, мм	Горизонтальный ход, мм	Поворот, град	Скорость линейная, м/с	Скорость угловая, град/с	Погрешность позиционирования, ±мм	
СМ40Ф280.01	40	—	1000	180	0,8	90	1,0	16А16Ц, 1П756ДФ3, 1Н713, МР-76М, 3М152ВФ2, 3М132
РВ-50	50	300	50	70	0,2	30	0,1	1713МФ3, 1А713МФ3, 1Б732МФ3
«Универсал-50м»	50	—	900	340	0,9	36	3,0	1713, 1713МФ3, МР-71
РР-1	80	1000	3230	180	0,8	180	1,0	1П752МФ3, 1П756ДФ3, 16К30Ф3, 1Б732МФ3
СМ80Ц.25.01А	80 (40*2)	1000	3600	180	0,8	90	0,2	1П752МФ3, 1П426ДФ3, 2А912, 2А932, 3М152, 3М161Е
УМ160Ф2.8101	160	2300	1000	90	0,5	120	0,5	МР-179, 16732Ф3, 6904ВМФ4, 16К30Ф3
СМ160Ф2.0501	320 160*2	1800	8900	60	0,5	120	0,5	16К30Ф3, 16Б16Т1, 1740РФ3, 2943РФ4, 2А913, 3М173, 3Т172

Выбранное оборудование и ПР можно скомпоновать в различных вариантах. При небольшом цикле обработки детали можно использовать робота для обслуживания одного станка. В случае большой длительности цикла обработки детали можно расположить группу станков вокруг одного робота или перемещать робота на транспортной тележке вдоль станков. Для сокращения времени обслуживания станка роботы оснащают двумя схватами или одним двухзахватным хватом.

Приблизительно количество станков, обслуживаемых одним роботом, можно определить по формуле

$$n_{\text{ст}} = \frac{t_{\text{м.с.}} K_z}{t_{\text{зап}}} + 1, \quad (2.23)$$

где $t_{\text{м.с.}}$ — машинное время работы оборудования; $t_{\text{зап}}$ — время работы ПР (смена инструмента, загрузка-выгрузка изделия); K_z — поправочный коэффициент, учитывающий паузы, сбои в работе. При циклической работе принимают $K_z = 0,7$.

Для оптимизации рабочего цикла системы машин во времени составляют циклограмму, отражающую моменты начала и окончания рабочих и холостых операций (ходов), а также их взаимное расположение во времени (цикле). Сокращение цикла путем максимального совмещения времени рабочих ходов (t_p) и времени холостых ходов ($t_{\text{хх}}$) является целью составления циклограммы. Циклограмма может координировать работу как отдельных узлов и механизмов станка, так и совокупности станков и вспомогательного оборудования, входящих в автоматизированную систему.

Методика построения циклограмм функционирования робото-технического комплекса (РТК)

Применительно к робото-техническим комплексам (РТК) циклограмма должна включать в выбранной последовательности все основные и вспомогательные операции (переходы) изготовления изделия, а также условные операции (переходы) для возможных изменений технологического маршрута.

Для построения циклограммы функционирования РТК необходимо:

- 1) проанализировать компоновку РТК и определить все движения (переходы) основного и вспомогательного оборудования (робота, станка, накопителя), необходимые для выполнения заданного цикла обработки детали;

- 2) определить (составить перечень) всех механизмов основного и вспомогательного оборудования, участвующих в формировании заданного цикла;

3) задать исходное положение механизмов робота, станка, транспортера и т. д.;

4) составить последовательность движений оборудования (механизмов) за цикл в виде таблицы;

5) определить время выполнения каждого движения t_i , используя формулы:

$$t_i = \frac{\alpha_i}{\omega_i} \text{ или } t_i = \frac{\beta_i}{\omega_i};$$

$$t_i = \frac{l_i}{v_i} \text{ или } t_i = \frac{h_i}{v_i},$$

где α_i, β_i — углы поворота механизмов; l_i, h_i — линейные перемещения механизмов; ω, v_i — соответственно паспортные скорости углового и линейного перемещения механизмов по соответствующей координате.

Для примера рассмотрим построение циклограмм функционирования РТК механообработки. Комплекс предназначен для обработки деталей на токарно-патронном полуавтомате модели 16К20Ф3. Загрузку-разгрузку и переустановку деталей осуществляет однозахватный ПР М20П40.01. В состав РТК входит накопитель для деталей и заготовок — тактовый стол. Компоновка РТК представлена на рис. 2.9.

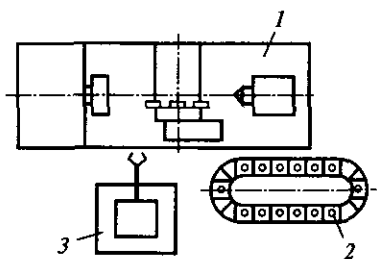


Рис. 2.9. Компоновка РТК:

1 — токарный полуавтомат модели 16К20Ф3;
2 — тактовый стол (накопитель заготовок и деталей); 3 — промышленный робот ПР модели М20П.40.01

1. Для выполнения заданного цикла обработки детали за два установа необходимы следующие движения (переходы):

загрузка заготовки в патрон станка;

зажим заготовки в патроне;

отвод руки ПР;

обработка детали (установ 1);

переустановка детали в патроне станка, отвод руки ПР;

обработка детали (установ 2);

разгрузка детали из патрона станка на тактовый стол, перемещение тактового стола на один шаг (на одну позицию).

2. В формировании заданного цикла участвуют механизмы

• станка:

зажима детали (патрон),

вращения детали,

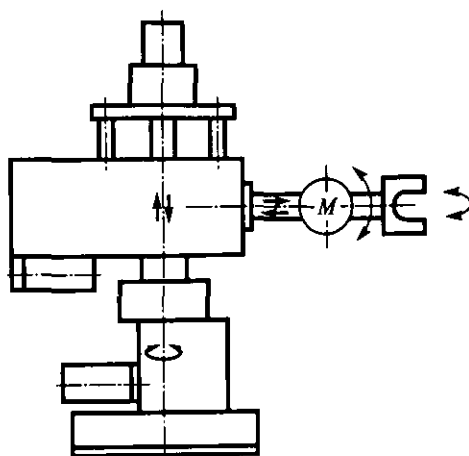


Рис. 2.10. Промышленный робот модели M20P.40.01

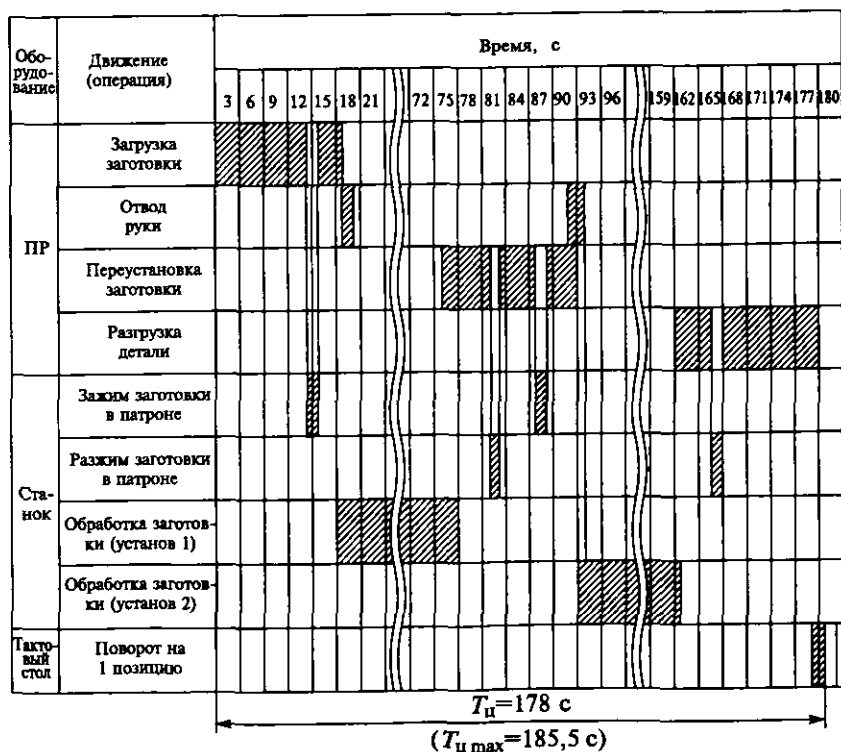


Рис. 2.11. Циклограмма работы (функционирования) РТК

подачи суппорта,
поворота резцовой головки,
перемещения ограждения;
• промышленного робота (рис. 2.10):
подъема руки,
поворота руки относительно вертикальной оси;
выдвижения руки,
зажима схвата,
ротации схвата (поворота схвата относительно горизонтальной оси),
поворота схвата относительно вертикальной оси;
• тактового стола:
перемещения детали (заготовки) на один шаг (на одну позицию).
3. Исходное положение оборудования и его механизмов:
патрон станка разжат, ограждение открыто;
суппорт в нулевой (исходной) позиции, в резцовой головке установлен необходимый комплект инструментов для обработки заданной детали, т. е. для выполнения заданного цикла обработки, линия центров станка выше уровня расположения заготовок на тактовом столе;
схват робота разжат, ось детали, первоначально зажимаемой в схвате, — горизонтальная; рука втянута и повернута к тактовому столу, схват (рука) на уровне расположения заготовок на тактовом столе, заготовка расположена на тактовом столе в призмах против схвата ПР.
4. В соответствии с составленной последовательностью движений механизмов оборудования за цикл построена циклограмма функционирования РТК (рис. 2.11).

2.4. Автоматизация загрузки, транспортирования и складирования изделий в условиях автоматизированного производства

В автоматизированных системах различного уровня широко используются транспортно-загрузочные, накопительные и складские устройства и системы. Они предназначены для перемещения изделий с позиции на позицию, их распределения по потокам, поворота, ориентации, межоперационного накопления и складирования. Характер работы, состав, конструкция, компоновка указанных устройств напрямую зависят от характеристик изделий и характера технологического процесса. Правильный выбор средств транспортирования, загрузки, накопления и складирования изделий непосредственно влияет на надежность, производительность и эксплуатационные затраты автоматизированных систем.

Первое, наиболее распространенное требование для деталей, поступающих на автоматы, автоматические линии, — их ориентация. Для этой цели используют целевые механизмы и устройства холостых ходов: ПР, автооператоры, различные ориентирующие устройства, среди последних наибольшее распространение получили вибрационные бункерно-ориентирующие устройства (ВБОУ). Различные конструкции и способы ориентации позволяют выбирать, а при необходимости заново конструировать необходимые ВБОУ.

Детали поступают в ВБОУ в виде неориентированной массы (навалом). После активной или пассивной (смешанной) ориентации их с помощью ПР или встроенных механизмов загрузки устанавливают на рабочие позиции.

Активную ориентацию осуществляют применением специальных порогов, прорезей, окон со смещением центра тяжести, струи сжатого воздуха, магнитного поля и других устройств. В качестве активно ориентирующих устройств используют схваты ПР и манипуляторов, которые извлекают детали из массы в определенном положении, т. е. строго ориентированно. Пассивная ориентация предполагает отсекаание деталей друг от друга и отсеивание неориентированных деталей с помощью специальных выступов, прорезей, пазов на подводящих и отводящих лотках. Смешанная ориентация является наиболее надежным и производительным способом подачи ориентированных деталей в зону обработки, тем более что в дальнейшем с помощью транспортно-ориентирующих устройств необходимо сохранить ориентацию деталей на последующих рабочих позициях.

Загрузочные устройства автоматизированных систем

Загрузочные устройства автоматизированных систем представляют собой группу целевых механизмов, включающую в себя подъемники, транспортеры-распределители, механизмы приема и выдачи изделий, лотковые системы, отводящие транспортеры, межоперационные накопители (бункерные и магазинные), автооператоры.

Магазинные загрузочные устройства в зависимости от способа транспортирования можно разбить на три класса:

- самотечные;
- принудительные (магазины-транспортеры);
- полусамотечные.

В устройствах всех классов детали, в основном в форме тел вращения, поступают, хранятся и выдаются в ориентированном состоянии.

В самотечных магазинах (гравитационных) заготовки перемещаются под действием сил тяжести; эти магазины используют для пода-

чи заготовок в плотную, а заготовок специальной формы — вразрядку, т. е. с интервалом, для чего каждую заготовку помещают в отдельное гнездо или между захватами транспортирующего элемента. Заготовки перемещают качением или скольжением.

В принудительных магазинах и транспортных устройствах заготовки перемещают с помощью приводных механизмов в любом направлении и с любой скоростью. Устройствами этого типа можно транспортировать заготовки с помощью несущих средств (транспортёров) или специальными захватами в плотную и вразрядку, поштучно или порциями. Наиболее широко используют устройства с орбитальным движением рабочих органов, перемещающих заготовки, с вращающимися гладкими валками, одно- и двухвинтовые, инерционные, барабанные, карусельные и др.

В полусамотечных магазинах заготовки скользят по плоскости, расположенной под углом, значительно меньшим угла трения. Заготовки перемещаются вследствие искусственного уменьшения силы трения между поверхностями скольжения при поперечном колебании несущей поверхности или в результате образования между поверхностями скольжения воздушной подушки.

Бункерные загрузочные устройства БЗУ представляют собой ёмкости с ориентированными деталями, расположенными в один или несколько рядов. Особенностью БЗУ следует считать отсутствие захватных и ориентирующих устройств и ручную ориентацию заготовок. БЗУ отличаются друг от друга расположением, характером перемещения заготовок и способом их выдачи. Как правило, в бункерах хранятся и выдаются детали простой формы: болты, шайбы, колпачки.

В бункере заготовки сосредоточены навалом, поэтому требуется автоматически захватывать их (ворошить) и ориентировать для последующей загрузки на оборудование. Бункеры могут иметь одну ёмкость для накопления и захвата заготовок или две ёмкости: одну — для накопления запаса заготовок, а вторую — для выдачи ориентированных заготовок.

Наиболее распространёнными являются вибрационные БЗУ. Принцип действия такого бункера основан на способности деталей поступательно перемещаться в процессе их вибрации. Существуют вибробункеры для вертикального подъёма деталей с направленной и со свободной подвеской лотка или чаши. Расчёт вибробункера проводят на основании условий требуемой производительности, размера заготовок, их массы, ориентировочной ёмкости бункера и других факторов.

И магазинные и бункерные загрузочные устройства функционально и конструктивно связаны с лотковыми системами, которые представляют собой лотки: прямые простые, роликовые, спиральные простые,

спиральные роликовые, спирально-овальные, змейковые, зигзагообразные, дугообразные, каскадные и др. Детали перемещают по лоткам как самотекам, так и принудительно, под действием вибрации. Последний способ является более производительным, хотя и требует дополнительных устройств и, следовательно, затрат. Расчет скорости и времени перемещения необходимо связать с надежностью загрузочных устройств, так же как и с производительностью и надежностью всей автоматизированной системы. Составной частью загрузочных устройств, в том числе и лотковых систем, являются отсекатели и питатели.

Отсекатели — механизмы поштучной выдачи — предназначены для отделения одной заготовки (или нескольких заготовок) от общего потока заготовок, поступающих из накопителя, и для обеспечения перемещения этой заготовки (или заготовок) в рабочую зону оборудования или на транспортер. По траектории движения различают отсекатели: с возвратно-поступательным движением, с колебательным движением, с вращательным движением. В качестве собственно отсекателей заготовок используют штифты, планки, кулачки, винты, бабы, диски с пазами.

Питатели предназначены для принудительного перемещения ориентированных заготовок из накопителя в зону зажимного приспособления или на транспортирующее устройство. Конструкции питателей разнообразны; их форма, размеры, привод подвижных частей зависят от конструкции оборудования, взаимного расположения инструмента и заготовки, от формы, размеров и материала подаваемых заготовок. И отсекатели, и питатели входят в состав автоматических загрузочных устройств — автооператоров.

Автооператоры — специальные целевые загрузочные устройства, состоящие из питателя, отсекателя, заталкивателя, выталкивателя (съемника) и отводящего устройства. Эти устройства являются специальными, т. е. их применяют для обслуживания одной или ряда подобных операций. Автооператоры выполняют возвратно-поступательное, колебательное перемещение деталей в зону обработки. При этом время работы автооператора строго синхронизировано с работой обслуживаемого оборудования. Автооператоры оснащаются механическими, магнитными, электромагнитными, вакуумными захватными устройствами. Производительность автооператора определяется производительностью оборудования, которое обслуживается этим автооператором. Надежность автооператоров зависит от условий их изготовления и эксплуатации и непосредственно влияет на надежность и эффективность работы оборудования.

Особым классом загрузочных устройств (ЗУ) являются роботы, которые служат для транспортировки, ориентации и загрузки изделий.

Промышленным роботом (ПР) называют быстро перенастраиваемое устройство с собственным программным управлением, позволяющим синхронизировать его действие с другими машинами и механизмами и выполнять с помощью своих механизмов циклически повторяющиеся операции технологического процесса, т. е. это устройство, которое легко вписывается в комплекс технологического оборудования для его обслуживания. Промышленные роботы применяют в металлообработке, штамповке, сборке, литейном производстве.

Технический уровень ПР определяют следующие параметры: пределы и степени свободы движения, способность движения в многомерном пространстве, погрешность позиционирования (линейная или угловая погрешность, с которой ПР выполняет свои функции), повторяемость, гибкость системы управления, объем памяти и др. Кроме того, ПР характеризуются своей грузоподъемностью, площадью зоны обслуживания, формами и габаритами захватываемых деталей.

По степени участия человека в управлении принято классифицировать роботы на три группы (три поколения). Роботы первого поколения работают по «жесткой» программе и требуют точного позиционирования изделий. Они имеют весьма ограниченные возможности по восприятию рабочей среды.

Роботы второго поколения (адаптивные роботы) способны приспосабливаться к изменяющейся обстановке и не требуют точного позиционирования изделий, так как снабжены датчиками обратной связи.

Роботы третьего поколения (интеллектуальные роботы) могут воспринимать, логически оценивать ситуацию и в зависимости от этого определять движения, необходимые для достижения заданной цели работы. Системы управления этих роботов снабжены встроенными ЭВМ.

В силу своей простоты и надежности наиболее распространены ПР первого поколения, с числом степеней свободы не менее пяти и без обратной связи.

По степени универсальности ПР делят на три группы:

- универсальные, предназначенные для выполнения основных и вспомогательных операций независимо от типа производства, со сменой захватного устройства и с наибольшим числом степеней свободы;
- специализированные, предназначенные для работы с деталями определенного класса при выполнении операций штамповки, механообработки, сборки, со сменой захватного устройства и с ограниченным числом степеней свободы;
- специальные, предназначенные для выполнения работы только с определенными деталями по строго зафиксированной программе и обладающие 1 – 3 степенями свободы.

По способу выполнения движения различают ПР с дискретным управлением (последовательное движение по каждой координате) и ПР с траекторным управлением (одновременное движение по нескольким координатам).

По методам управления роботы можно классифицировать на два типа: ПР с разомкнутой системой управления (например, с временной зависимостью) и ПР с замкнутой системой управления (скорости определяет сам робот).

Системы управления роботами подразделяют на релейные (двухпозиционные), обеспечивающие движение ПР по упорам, и шагового типа, обеспечивающие движение ПР по контрольным точкам, когда величина шага контролируется от позиции к позиции (от одной точки к другой).

В отличие от станков роботы программируют, как правило, методом обучения, когда на первом цикле оператор, управляя роботом вручную, имитирует цикл работы. Вся последовательность движений робота, координаты позиций и траектории перемещений запоминаются и воспроизводятся в последующих циклах автоматически.

По типу привода различают гидравлические, пневматические, электрические, смешанные ПР. Промышленные роботы бывают неподвижными (стационарными) и подвижными. И те, и другие могут быть как напольными, так и подвесными. К подвижным относятся транспортные ПР, обслуживающие линии, участки, комплексы.

В состав ПР входят:

- механизмы захвата и захватные устройства;
- механизмы движения рук по цилиндрической поверхности (рука движется по вертикали и поворачивается) и по сферической поверхности;
- механизмы перемещения;
- датчики.

Важной составной частью роботов являются датчики: контактные, сигнализирующие о прикосновении руки робота; локационные, определяющие скорость движения и расстояние до предметов; телевизионные и оптические, образующие искусственное зрение; датчики усилий и моментов на исполнительных руках робота при проведении операции; датчики, различающие цвет, температуру, звучание и другие факторы. Система датчиков служит источником обратных связей для управления роботом. Сигналы датчиков нужным образом преобразуются и обрабатываются на ЭВМ с целью формирования сигналов управления, подаваемых на приводы исполнительных рук. В результате робот начинает действовать с учетом фактической обстановки, т. е. он получает возможность адаптации (приспособления своих действий) к реально складывающейся обстановке.

Расчет и конструирование ПР проводят, исходя из комплекса задач по обслуживанию оборудования и выполнению технологических операций, статических и динамических требований при выполнении этих задач (погрешность позиционирования, грузоподъемность, траектории движений, скорости и ускорения подвижных частей). При этом выполняют тщательный анализ существующих технических решений для каждой функциональной части робота (захватов, рук, датчиков, механизмов передвижения, системы управления и пр.) В силу этой специфики при конструировании роботов используют модульный принцип, т.е. составляют ПР из конструктивно законченных отдельных функциональных частей: модулей линейных и угловых перемещений, сменных захватных устройств, комплектов переходных элементов.

Преимуществами ПР являются:

- гибкость, возможность обслуживания различного технологического оборудования;
- возможность выравнивания работы обслуживаемого оборудования линии, комплекса;
- высвобождение обслуживающего персонала, улучшение условий его труда.

Выбор моделей и составление циклограмм функционирования ПР рассмотрены в § 2.3.

Транспортные устройства автоматизированных систем

Транспортные устройства автоматизированных систем предназначены для перемещения деталей и сборочных единиц с позиции на позицию, распределение деталей по потокам, поворота и ориентации деталей. Все транспортные устройства делят на автоматизированные системы с жесткой и гибкой связью.

Транспортные механизмы автоматизированных систем с жесткой связью включают в себя: а) шаговые транспортеры; б) поворотные столы и кантователи; в) перегружатели; г) рейнеры; д) приспособления-спутники; е) механизмы возврата приспособлений-спутников.

Транспортные механизмы автоматизированных систем с гибкой связью включают в себя: а) транспортеры-распределители; б) лотки; в) делители потоков; г) подъемники; д) транспортные роботы; е) ритмопитатели.

Сюда же в качестве составной части транспортных механизмов с гибкой связью можно отнести транспортеры-накопители; магазины-накопители; бункера-накопители.

К группе транспортных механизмов систем с гибкой связью отно-

сят и транспортные средства переналаживаемых автоматизированных систем. Их особенностью является широкое использование автоматизированных складов и накопителей, обслуживаемых штабелерами, транспортных тележек с манипуляторами, приемно-передающих устройств, поворотных столов, что позволяет объединять их в транспортно-накопительные системы (ТНС). Характер работы, состав и конструктивные особенности транспорта зависят от характеристик изделий и характера основных и вспомогательных операций. Работа транспорта в наибольшей степени влияет на надежность и производительность автоматизированных систем.

Технические средства автоматизированных транспортных систем

Технические средства ТНС делят на две группы: основное оборудование и вспомогательное.

Основное оборудование предназначено для перемещения грузов в условиях автоматизированного производства (стеллажные и мостовые краны-штабелеры, транспортные роботы, конвейеры, накопители, перегрузочные и ориентирующие устройства, транспортно-складская тара, средства АСУ).

Вспомогательное оборудование: толкатели, ориентаторы, подъемники, питатели, адресователи.

Транспортные и накопительные средства выбирают на основе анализа грузопотоков на участке или в цехе с учетом свойств материалов изделий. При выборе схемы грузопотоков необходимо учитывать наименьшие по протяженности маршруты перемещения грузов, минимальное применение перегрузочных устройств, кантователей.

Особенностью АУ является применение в качестве транспортных средств кранов-штабелеров и транспортных промышленных роботов. Все транспортные средства, используемые на этих участках, должны быть оснащены системами автоматического адресования и иметь устройства автоматической погрузки-разгрузки грузов.

Кроме того, в условиях автоматизированного производства широко применяют подвесной транспорт, напольные конвейеры, транспортеры, тележный транспорт.

К подвесному транспорту относятся:

- подвесные конвейеры для внутрицеховых и межоперационных перемещений деталей и изделий весом до 2 т на расстояние до 1000 м, для создания подвижных запасов деталей на рабочих подвесках конвейера; более тяжелые грузы весом до 2,5 т и выше могут транспортироваться на грузотянущих конвейерах с тележками;

- подвесные монорельсы для внутрицеховых грузопотоков максимальной грузоподъемностью до 20 т;
- монорельсовые транспортные роботы с устройствами для перемещения и манипулирования изделиями весом до 300 кг;
- подвесные дороги с электротягачом и прицепными тележками грузоподъемностью до 500 кг.

К напольным конвейерам и транспортерам для поточного производства относятся:

- роляганги (приводные и неприводные наклонные) для межоперационного перемещения изделий весом до 1200 кг;
- ленточные конвейеры для транспортирования мелких деталей весом до 250 кг с малым тактом выпуска;
- тележечные конвейеры, применяемые для транспортирования изделий на сборочном участке, реже на механических участках. В зависимости от габаритов изделий применяют вертикально и горизонтально замкнутые конвейеры грузоподъемностью до 8000 кг и до 1000 кг соответственно;
- шагающие конвейеры с пульсирующим перемещением изделий при сборке грузоподъемностью до 7 т при относительно малых габаритах и простоте конструкции.

К напольно-тележечному внутрицеховому транспорту относятся:

- электропогрузчики и электротележки (электрокары) грузоподъемностью до 0,5 т;
- электроштабелеры напольные грузоподъемностью до 2 т;
- транспортные напольные роботы (рельсовые и безрельсовые), смонтированные на тележках и управляемые по программе.

Монорельсовые транспортные роботы (напольные и подвесные) предназначены для межоперационного и внутрицехового перемещения деталей и изделий в условиях автоматизированного производства. Они перемещаются по принудительному маршруту, т. е. в строгом соответствии с заданной программой. Мостовые и напольные безрельсовые роботы перемещаются по свободному маршруту, т. е. между любыми позициями загрузки (разгрузки), находящимися в пределах обслуживаемой зоны.

Напольные транспортные роботы могут двигаться:

1) вдоль провода, уложенного на глубине 40–60 мм от поверхности пола (по проводу пропускают ток силой в несколько сотен миллиампер, с частотой 2...20 кГц и напряжением не более 12 В; создается переменное электромагнитное поле, за которым следят датчики транспортного робота);

2) по светоотражающей полосе, прикрепленной к полу (слежение за трассой осуществляется с помощью фотосчитывающих датчиков,

Таблица 2.6

**Технические характеристики транспортных монорельсовых роботов
(привод электромеханический)**

Параметры робота	Модель робота					
	ТРМ-50	ТРМ-100	ТРТ-2-250	МИУ-7	РТШ-8-50	РТП-250
Грузоподъемность, кг	50	100	250	250	50	250
Число степеней подвижности	2	2	3	3	2	2
Точность позиционирования, мм	±10	±10	±10	±3	±10	±5
Ход, мм:						
вертикальный	2700	2700	2800	2000	2200	2900
горизонтальный	Неограниченный			30000	Неограниченный	
горизонтальный захвата	—	—	±50	440	—	—
Скорость перемещения по горизонтали, м/с	1,0	1,0	0,75	0,34	0,5	0,5
Система управления	Локальный автомат без памяти	На базе ЭВМ «Электроника-60»	Позиционная с автоматическим адресованием	Цикловая	Цикловая	Цикловая

Таблица 2.7

**Технические характеристики транспортных
напольных безрельсовых роботов**

Параметры робота	Модель робота		
	КИЭ К2.2.0016	Электроника НЦ-ТМ-03	РБТ-1
Грузоподъемность, кг	200	500	500
Число степеней подвижности	3	3	3
Погрешность позиционирования, мм:			
продольная	±5	±5	±10
поперечная	±5	±20	±5
Перемещение платформы, мм:			
вертикальное	400	80	50
горизонтальное	—	—	1030
Угловые перемещения, град	90	90	—
	180	180	—
	270	270	—
Слежение за трассой	По гироскопу	По фотодатчику	По фотодатчику
Скорость перемещения по трассе, м/с	До 1,4	До 0,8	До 1,0

реагирующих на изменение световых потоков и вырабатывающих управляющие сигналы);

3) по программе с использованием гироскопа.

Технические характеристики транспортных напольных монорельсовых и безрельсовых роботов приведены в табл. 2.6 и 2.7.

В качестве *накопителей* можно использовать автоматизированные склады, обслуживаемые штабелерами и транспортными роботами, и межоперационные магазины-накопители (напольные и подвесные). Магазины-накопители применяют в условиях поточного производства для деталей типа тел вращения, а подвесные накопители — в основном для корпусных деталей и деталей сложной конфигурации.

Количество подъемно-транспортных средств для цеха (участка) определяют либо подробно с учетом грузопотоков, массы перемещаемых грузов, либо по данным базового производства.

Выбор транспортно-складских систем для автоматизированных производств

При создании автоматизированных транспортно-складских систем (АТСС) решают задачи не только хранения заготовок, деталей, инструмента, оснастки, но и выбора наиболее эффективных, рациональных компоновок оборудования и маршрутов.

Существует два основных конструктивных варианта построения АТСС: с совмещенными и отдельными транспортной и складской подсистемами.

На рис. 2.12 показана ГПС с совмещенной транспортно-накопительной системой. Станки 1 расположены параллельно стеллажу-накопителю 2. Кран-штабелер 4 перемещается вдоль фронта станков и обслуживает как стеллаж-накопитель, так и станки. По команде от системы управления кран-штабелер забирает из определенной ячейки стеллажа-накопителя необходимую заготовку и перемещает ее на перегрузочный стол 3 соответствующего станка. Готовые детали кран-штабелер забирает с перегрузочного стола и переносит в свободные ячейки стеллажа-накопителя. В данном случае не требуется специальной транспортной системы для обслуживания станков, так как эти функции выполняет кран-штабелер.

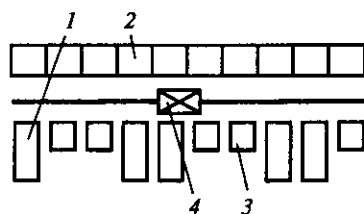


Рис. 2.12. Схема ГПС с совмещенной транспортно-накопительной системой: 1 — станки; 2 — стеллаж-накопитель; 3 — перегрузочный стол; 4 — кран-штабелер

Схема ГПС с отдельной транспортно-накопительной системой с

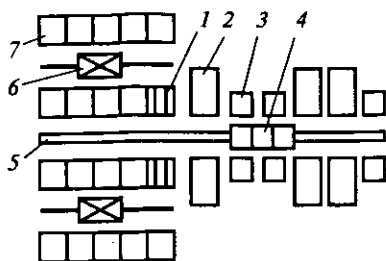


Рис. 2.13. Схема ГПС с раздельной транспортно-накопительной системой: 1 — перегрузочный стол; 2 — станки; 3 — накопитель; 4 — транспортная тележка; 5 — рельсовый путь; 6 — кран-штабелер; 7 — стеллажный склад

четырьмя стеллажными накопителями 7 и двумя кранами-штабелерами 6 показана на рис. 2.13. В данной системе автоматическая транспортная тележка 4, перемещаясь по прямолинейному транспортному рельсовому пути 5, обслуживает несколько единиц технологического оборудования. Из стеллажного склада 7 кран-штабелер 6 подает заготовки в таре на перегрузочный стол 1. Далее транспортная тележка по мере необходимости забирает с перегрузочного стола тару с заготовками и транспортирует ее к накопителям 3 станков 2.

Установив тару с заготовками на накопитель, перегрузочное устройство транспортной тележки забирает тару с готовыми деталями и транспортирует ее на перегрузочный стол стеллажного склада. Затем кран-штабелер по команде от системы управления забирает тару с готовыми деталями и устанавливает ее в свободную ячейку стеллажа.

В приведенных компоновках использованы автоматизированные стеллажные склады-накопители, которые предназначены для приема, хранения, выдачи в производство и учета заготовок, основного и вспомогательного материалов, тары, инструментов, приспособлений, роботов, манипуляторов, готовых изделий, бракованных деталей, отходов производства с целью обеспечения эффективного производственного процесса переналаживаемой автоматизированной системы.

В зависимости от конструктивных особенностей и технической оснащенности выделяют основные типы автоматизированных складов:

- клеточные стеллажные с автоматическим краном-штабелером или мостовым краном-штабелером;
- гравитационные стеллажные с краном-штабелером;
- элеваторные стеллажные;
- подвесные в сочетании с толкающим конвейером, имеющим автоматическое адресование грузов.

Наиболее распространены склады со стеллажными роботами-штабелерами, поскольку они весьма производительны, занимают мало места и их легче автоматизировать. Робот-штабелер — напольная рельсовая машина, позволяющая накапливать заготовки и материалы в ячейках склада и осуществлять выдачу заготовок и материалов в стандартной таре или поддонах на приемно-выдающие устройства складов. Технические характеристики роботов-штабелеров приведены в табл. 2.8.

Технические характеристики складских роботов-штабелеров

Параметры	Модель робота-штабелера				
	СА-05	РШ-500	С4225.02	РСК-500	РСК-1000
Грузоподъемность, кг	500	500	500	500	1000
Габариты тары, мм:					
длина	600	800	800	640	1260
ширина	800	600	600	840	860
высота	400	320	400	760	750
Высота помещения, м	3,7...6,2	5,2	6,2	8,0	8,0
Скорость перемещений, м/мин:					
горизонтального	2...63	1...65	2...90	0...132	0...160
вертикального	2...12	1...18	2...80	0...32	0...32
выдвижение захвата	12,0	10,0	10,0	16,0	16,0
Точность позиционирования, мм:					
горизонтальная	±4	±2	±2	±5	±15
вертикальная	±4	±4	±2	±5	±15
выдвижение захвата	—	±3	±2	±5	±10
Габариты, мм:					
длина	3000	3400	2860	—	—
ширина	700	700	860	—	—
высота	5400	4760	2800	—	—
Управление	ЭВМ «Электро- ника-60»	ЭВМ АСВТ М-6000	—	—	—

В единичном и мелкосерийном производстве целесообразно применять стеллажные склады с автоматическими мостовыми кранами-штабелерами.

При небольшой номенклатуре грузов и сравнительно больших запасах материалов и деталей используют автоматизированные склады с гравитационными стеллажами. Склады с автоматизированными элеваторными стеллажами целесообразно применять при малых грузопотоках, небольших сроках и запасах хранения грузов и малых размерах самих деталей и изделий.

К технологическому оборудованию автоматизированных складов относят:

- складскую тару;
- стеллажи;
- краны-роботы-штабелеры;
- перегрузочные устройства.

Выбор типа оборудования склада осуществляют с учетом грузопотоков участка или цеха, конструктивно-технологических особенностей изделий и заготовок, сроков хранения, применяемого на участке технологического оборудования.

Компоновка складов зависит от типа и характера производства, производственной программы, внутрицехового и внутрисистемного транспорта, характеристик производственного здания, где размещается проектируемый участок или цех, а также от типа и оборудования самих складов, их основных параметров.

Наиболее рациональна компоновка складов в АПС, когда они максимально приближены к технологическому оборудованию. При этом кран-штабелер выполняет не только функции складирования, но и распределяет по рабочим местам материалы, заготовки, изделия, т. е. стыкует склад с технологическим комплексом. Один или несколько стеллажей склада размещают вдоль производственного участка рядом с оборудованием.

При линейных компоновках АПС склады располагают в торцах производственного участка и оснащают стеллажными или мостовыми автоматическими кранами-штабелерами (рис. 2.14). При небольших

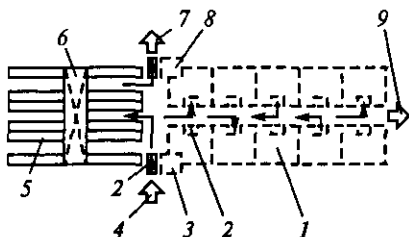


Рис. 2.14. Линейная компоновка склада ГПС:

1 — производственный участок; 2 — перегрузочные устройства и накопители; 3 — участок входного контроля; 4 — поступление материалов, заготовок, инструмента, тары; 5 — склад материалов, заготовок, инструмента, тары, готовых изделий; 6 — мостовой складской робот; 7 — выход готовых и бракованных изделий; 8 — участок ОТК; 9 — выход отходов производства

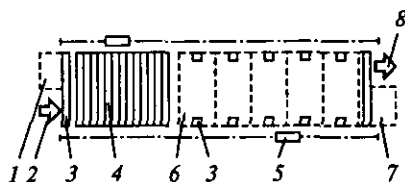


Рис. 2.15. Боковая компоновка склада ГПС:

1 — участок входного контроля; 2 — поступление материалов, заготовок, инструмента, тары; 3 — перегрузочные устройства и накопители; 4 — гравитационный склад заготовок, инструмента, готовых изделий; 5 — производственный участок; 6 — транспортно-складской робот; 7 — участок ОТК; 8 — выход готовых и бракованных изделий

грузопотоках роботы-штабелеры используют как транспортно-складские роботы и для подачи заготовок на перегрузочные устройства. Мостовые краны-штабелеры используют при меньших грузопотоках и больших объемах хранения материалов, заготовок, готовых изделий.

При большой потребной вместимости склада и небольшой номенклатуре хранимых материалов, заготовок, изделий целесообразна компоновочная схема с блочным гравитационным складом, которая позволяет эффективно использовать площадь и объем производственного здания (рис. 2.15). Для подобных складов возможна компоновка с перпендикулярным в плане расположением стеллажей по отношению к рядам станков или линейная компоновка, при которой стеллажи ориентированы в том же направлении, что и ряды станков производственного участка. Последние ТНС широко используют в мелкосерийном производстве на предметно-замкнутых участках.

Предпочтительность применения того или иного варианта компоновок и технического оснащения определяют расчетом.

При проектировании автоматических складов определяют:

- функции склада;
- потребную вместимость;
- параметры склада;
- выбирают или проектируют нестандартное оборудование;
- выбирают системы автоматического управления;
- технико-экономические показатели.

Потребную вместимость склада устанавливают в соответствии с нормативными запасами грузов, хранящихся на складе.

2.5. Особенности конструкций инструмента и приспособлений в автоматизированном производстве

Наиболее значительные потери времени при механической обработке в условиях АП связаны с транспортированием, установкой, закреплением, съемом и наладкой инструмента и приспособлений. Поэтому обеспечение повышенной производительности, надежности, гибкости технологических процессов определяет роль и место инструментальной оснастки и приспособлений в АП. Инструментальная оснастка АП состоит не только из режущего и вспомогательного инструментов, но и приборов настройки режущего инструмента и инструментальных головок вне станка, системы автоматической смены инструментов, системы подналадки режущего инструмента, системы диагностики и контроля состояния инструмента и оборудования.

Инструментальная оснастка АПС имеет свою специфику по конструктивному оформлению, качеству и точности изготовления. Ее производят с жесткими требованиями по условиям взаимозаменяемости, она должна быть более жесткой, массивной и виброустойчивой, чем в условиях неавтоматизированного производства.

Для обеспечения заданной точности при обработке широкой номенклатуры сложных и часто дорогих деталей без применения специальных приспособлений режущий инструмент должен обладать: высокой режущей способностью и надежностью (благодаря использованию наиболее совершенных инструментальных материалов); повышенной точностью (за счет изготовления инструментов по специальным ужесточенным стандартам); универсальностью, позволяющей обрабатывать сложные детали за один автоматический цикл; высокой жесткостью и виброустойчивостью; быстросменностью; возможностью автоматической настройки и поднастройки.

Материал режущего инструмента, работающего в АП, должен обеспечивать стабильность режущих свойств: повышенную общую и особенно размерную стойкость; прочность и надежность инструмента. Существует ряд путей реализации указанных требований:

- применение дорогостоящих, но обладающих высокими режущими свойствами, быстрорежущих сталей (P18, P18Ф2, P18K5, P18Ф2K5, P14Ф4, P10K5Ф5, P9K5, P9Ф5);
- обеспечение мелкозернистой структуры сталей (например, за счет добавления ванадия);
- обеспечение баллакарбидной неоднородности (два и менее) за счет многократной проковки;
- применение твердых сплавов, обладающих прежде всего повышенной износостойкостью (сплавы с высоким содержанием титана (Ti) и низким содержанием кобальта (Co));
- применение износостойких покрытий (азотирование, карбонитрация, плазменное напыление и др.).

Твердые сплавы склонны к выкрашиванию, поэтому при работе с ударными нагрузками лучше применять сплавы с высоким содержанием кобальта, например, твердый сплав ВК8, имеющие невысокую размерную стойкость, но очень высокую стойкость к ударным нагрузкам (за счет большого процента содержания кобальта, играющего роль связующего элемента). Повышенную износостойкость имеют сплавы с большим содержанием титана. Например, сплав Т30К4 (30 % Ti и 4 % Co) имеет повышенную износостойкость, однако он очень хрупкий, поэтому его нельзя применять для работы с ударными нагрузками и вибрациями.

Для обеспечения необходимой точности обработки, размерной

стойкости и быстросменности инструмента в условиях АП применяют сменные многогранные пластины (СМП), которые механически крепятся в гнезде державки. В комплект поставки одного инструмента может входить несколько десятков режущих пластин из твердых сплавов и композитов, в том числе с износостойкими покрытиями.

Следующим шагом в направлении совершенствования инструмента для АП явилась система блочного инструмента, впервые предложенная фирмой «Сандвик коромант» (Швеция). Сущность системы состоит в том, что державку резца делают из двух частей: корпуса и головки. Корпус постоянно закреплен в суппорте или револьверной головке, а при автоматической смене инструмента заменяется только головка, снабженная СМП. По мере изнашивания пластина поворачивается или заменяется. При этом используют малогабаритные манипуляторы и магазины для размещения головок.

На многооперационных станках с ЧПУ и гибких производственных модулях применяют те же режущие инструменты, что и на отдельных станках с ЧПУ (токарных, фрезерных, сверлильных и др.). Различие состоит в том, что и универсальный, и специальный режущий инструмент включен в состав системы инструментальной оснастки, основой которой служит универсальная унифицированная подсистема вспомогательного инструмента, предназначенная для станков разных моделей. В подсистему входят наборы оправок, цанговых патронов, переходных втулок, державок и прочих приспособлений, которые необходимы для выполнения всех основных видов обработки поверхностей деталей.

Типовые оправки для крепления режущего инструмента на оборудовании с ЧПУ имеют следующие характерные поверхности:

- для силового зажима оправки в шпинделе станка и в некоторых случаях для установки элементов, кодирующих номер инструмента;
- для базирования в шпинделе станка;
- контактирующие с захватами автоматической руки;
- для установки и закрепления режущего и вспомогательного инструментов.

Вспомогательный инструмент служит для соединения режущих инструментов со шпинделями станков или суппортами. Конструкция вспомогательного инструмента определяется присоединительными поверхностями, предназначенными для крепления на станке и режущем инструменте. При выборе оптимальных конструкций вспомогательного инструмента руководствуются следующими критериями: универсальность, жесткость, быстросменность, переналаживаемость, надежность, которые определяют, исходя из основного (интегрального) критерия — эффективности эксплуатации.

Вспомогательный инструмент, как правило, представляет собой многоинструментальную головку, которую настраивают и заменяют в зависимости от стойкости «лимитирующего инструмента», т. е. инструмента, работающего в наиболее напряженном ритме. Быстрая смена многоинструментальной державки дает возможность снизить потери по инструменту.

Существенной особенностью станков с ЧПУ в составе АПС является высокая концентрация обработки. Чем выше степень концентрации, тем выше эффективность обработки. Система инструментообеспечения не должна препятствовать повышению концентрации обработки. На практике это положение реализуют с помощью инструментальных магазинов, манипуляторов для смены инструментов, систем коррекции траектории инструментов в сочетании с системами автоматической размерной настройки и загрузки инструментальных комплектов в магазины.

К присоединительным поверхностям вспомогательного инструмента предъявляют довольно жесткие требования: шероховатость должна находиться в пределах $R_a = 0,2 \dots 0,8$ мкм; твердость $HRC_s = 50-60$.

Для деталей с присоединительными поверхностями рекомендуют сталь 18ХГТ с цементацией на глубину 0,1...1,2 мм и последующей закалкой.

Для изготовления зажимных цанг рекомендуется сталь марки 60С2А с закалкой $HRC_s = 45-55$. Поводки и сухари для передачи крутящих моментов изготавливают из стали 40Х с закалкой $HRC_s = 45-50$.

Для станков различных моделей разработана унифицированная подсистема вспомогательного инструмента, состоящая из оправок, цанговых патронов для крепления вращающегося инструмента, переходных втулок, державок для патронов, расточных головок и других элементов. У всех вспомогательных инструментов, используемых в АПС, предусмотрены специальные места для захвата их автооператором при смене, а также специальные элементы (кодовые кольца, резьбовые штыри, кодовые гребенки) для кодирования и поиска инструментов в инструментальных наладках и магазинах.

Кодирование инструментов особенно необходимо при их использовании на многооперационных станках с ЧПУ, в инструментальных магазинах которых может храниться более 100 различных инструментов. По конструктивному исполнению магазины разнообразны (дисковые, цепные, кассетные и пр.). Магазин располагают на шпиндельной бабке, колонне, столе, вне станка на отдельном фундаменте. При многоинструментальной обработке все инструменты должны работать в определенной последовательности в соответствии с управляющей программой (УП). Поэтому необходима система поиска и кодирова-

ния инструмента. В конструкциях МС применяют три системы поиска режущего инструмента:

- с кодированием номера инструмента;
- с кодированием номера гнезда инструмента;
- без кодирования, но с расположением инструмента в последовательности обработки по УП.

Кроме указанных требований в условиях переналаживаемого АП необходимо обеспечить стыковку и взаимодействие всех элементов инструментальной оснастки с системами контроля и диагностики, транспортирования и складирования, с АСУ ТП, САПР, АСУП.

Размерная настройка инструмента

Настройку режущего инструмента в условиях АП можно производить вне станка по методу полной и неполной взаимозаменяемости и на станке с использованием станочных средств контроля. Для настройки режущего инструмента вне станка применяют специальные многокоординатные оптические приспособления, и хотя время настройки является совмещенным, затем, как правило, требуется дополнительная настройка по результатам пробного прохода (метод неполной взаимозаменяемости). Кроме того, настройка вне станка не может устранить погрешности, возникшие в результате многократного использования одного и того же инструмента, она требует специального оборудования и производственных площадей для его установки.

Более предпочтителен в условиях АП метод настройки по результатам измерения деталей на станке, что характерно для обработки корпусных деталей, и режущих кромок самого инструмента. Эффективным решением является оснащение станков автоматическими системами комбинированной настройки по результатам измерения детали и инструмента (рис. 2.16.), разработанными в Уральском политехническом университете.

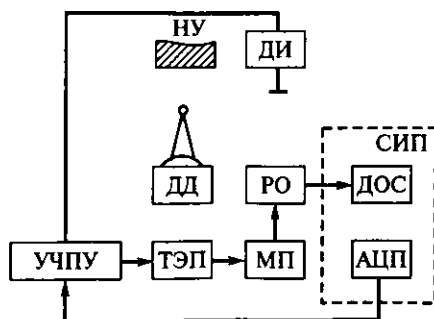


Рис. 2.16. Структурная схема автоматической системы размерной настройки для одной координаты: УЧПУ — устройство ЧПУ типа CNC; ТЭП — транспортный электропривод; МП — механическая передача; РО — рабочий орган станка; СИП — система измерения положения рабочего органа; ДОС — датчик обратной связи по положению рабочего органа; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ДИ — датчик положения инструмента; ДД — датчик положения контролируемой поверхности детали; НУ — настроечный упор

При обработке заготовок на автоматизированном оборудовании необходимо обеспечить стабильность размеров обрабатываемых поверхностей. Это можно сделать за счет компенсации влияния размерного износа путем автоматического введения подналадочных импульсов при обработке для перемещения инструмента к детали, т. е. в «плюс», или от детали, т. е. в «минус». Величина перемещений и их частота зависят от износа инструмента, определяемого условиями обработки, материалом инструмента и детали, геометрией и стойкостью инструмента. Для осуществления поднастройки используют результаты измерения как детали, так и инструмента на станке. Текущее значение вылета инструмента сравнивают с заданным по программе. Величину рассогласования используют для коррекции управляющей программы. Аналогично используют результаты измерения текущих размеров деталей.

Применение приспособлений в условиях автоматизированного производства

Способы базирования, фиксации и замены изделий в АП характеризуются повышенной надежностью, точностью установки, унификацией элементов базирования и закрепления, удобством автоматической установки изделий в приспособлении. Базовые поверхности те же, что и для условий неавтоматизированного производства (центровые гнезда, торцы, плоскости, расточки), но при выборе базовых поверхностей необходимо обеспечивать принцип концентрации обработки и возможность применения автооператоров при установке и снятии деталей.

Для эффективного использования технологических возможностей всего оборудования АПС станочные приспособления помимо точности, жесткости должны удовлетворять требованиям по обеспечению: базирования и закрепления широкой номенклатуры изделий с помощью простейших наладочных элементов, точной ориентации в координатной системе станка, свободного доступа инструмента ко всем обрабатываемым поверхностям.

Для установки деталей в АП применяют автоматизированные стационарные приспособления и приспособления-спутники. Последние служат для установки заготовок не только для их последующей обработки, но и транспортирования в соответствии с требованиями ТП. Установленная на спутнике деталь или группа деталей закрепляется и переходит от операции к операции, разгружаясь в конце технологического процесса и возвращаясь в его начало для новой загрузки.

Различают три вида стационарных приспособлений: специальные

(одноцелевые, переналаживаемые), специализированные (узкоцелевые, ограниченно переналаживаемые), универсальные (многоцелевые, широко переналаживаемые). В качестве стационарных приспособлений и сменных наладок приспособлений-спутников в переналаживаемом многономенклатурном производстве применяют стандартные системы приспособлений: универсально-сборные (УСП), универсально-наладочные (УНП), сборно-разборные (СРП), специализированные наладочные (СНП) и другие системы многократного применения. Эти приспособления состоят из базового агрегата и наладок, которые устанавливают на базовый агрегат и регулируют непосредственно на столе станка или нижней плите спутника. В отличие от мелкосерийного производства, где применяют немеханизированные наладочные приспособления, в автоматизированном серийном и крупносерийном производстве применяют пневматические или гидравлические приспособления. Специализированные наладочные системы имеют специализированные базовые агрегаты для установки геометрически подобных заготовок, а универсально-наладочные приспособления — универсальные базовые агрегаты для установки различных заготовок.

Характерной особенностью приспособлений является их быстрая переналаживаемость на основе унификации элементов базирования, фиксации, закрепления. В качестве основных и вспомогательных опор приспособлений применяют опорные пластины, опорные шайбы, установочные пальцы, центры, призмы, установочные оправки, патроны. К точности изготовления опор предъявляют повышенные требования, так как от нее зависят величины погрешности базирования изделия и упругих деформаций при закреплении и обработке.

Положение изделий на установочных поверхностях приспособлений уточняют с помощью фиксаторов, которые бывают подвижными и неподвижными. Число фиксаторов в приспособлении должно быть минимальным (один-два).

Установка изделия в приспособление осуществляется в определенной последовательности: предварительное положение (ориентирование) определяется установочными элементами, а окончательное — после ввода фиксаторов в отверстия или пазы изделия. Закрепление изделия производится специальными зажимами после фиксации.

В качестве зажимных механизмов автоматизированных приспособлений используют рычажные, клиновые, клино-плунжерные, рычажно-шарнирные, реечные, винтовые и другие механизмы. Необходимым условием надежной и длительной работы приспособлений является применение в них специальных блокирующих устройств, не допускающих превышения сил зажима больше заданной величины во избежание повышенных деформаций изделий и корпусов приспособлений.

Приводы механизмов зажима должны обеспечивать возможность регулировки силы зажима в определенных пределах. Этому требованию удовлетворяют гидроприводы, пневмогидроприводы и пневмоприводы. Кроме них в автоматизированных приспособлениях используют магнитные и электромагнитные, вакуумные, электромеханические приводы.

Если конструкция изделия не позволяет устанавливать и закреплять его в стационарном приспособлении, то такое изделие устанавливают в приспособлениях-спутниках, которые можно разделить на две группы: спутники, на которых изделие только базируется, а закрепление спутника с изделием производится в стационарном станочном приспособлении; спутники, на которых изделие и базируется, и закрепляется. В приспособлениях станков крепятся только спутники.

Установку, закрепление и удаление изделий из спутника после изготовления производят вручную или автоматически специальными устройствами, установленными на загрузочной и разгрузочной позициях в начале и в конце АЛ или участка. Закрепление осуществляется различными прихватами с помощью резьбовых зажимов.

Приспособление-спутник состоит из двух частей: нижней нормализованной с привернутыми элементами для базирования и фиксации на станках и верхней специальной (сменной наладки) для установки и закрепления изделий. В зависимости от количества устанавливаемых изделий приспособления-спутники подразделяются на одно- и многоместные. Одноместные приспособления применяют для изготовления крупных изделий, а многоместные — для средних изделий.

На спутниках можно обрабатывать корпусные детали, плиты, рычаги, шатуны и даже детали в форме тел вращения. Применение этих приспособлений обеспечивает правильную ориентацию изделий при перемещении от одной рабочей позиции к другой, возможность применения нормализованных конструкций станочных приспособлений для закрепления спутников. Но при этом возрастает погрешность базирования изделий, что можно учесть при наладке оборудования, усложняются транспортные устройства АПС, увеличивается занимаемая ее площадь.

Методика расчета и проектирования всех приспособлений, применяемых в условиях АП, должна предусматривать возможность их быстрой переналадки и обработки заготовок с переменными или увеличенными припусками, что необходимо в условиях широкономенклатурного производства.

2.6. Компоновочные схемы автоматизированных производственных систем

Компоновка автоматизированных систем определяется ТП, конструктивно-технологическими особенностями, заданным объемом выпуска изделий, конкретными условиями производства и характеризуется структурой технических средств и схемой их расположения.

Структура технических средств — качественный и количественный состав основного и вспомогательного оборудования — зависит от характера производственного процесса и объема выпуска изделий. Например, форма специализации производственной системы определяет однотипность и взаимозаменяемость технологического оборудования; наличие межоперационных заделов вызывает необходимость включения в АПС магазинов-накопителей; межоперационная передача деталей в процессе обработки требует единой транспортной системы, а работа по принципу склад — станок — склад — локальных транспортных систем. Необходимость межоперационного контроля требует организации контрольных постов (ячеек), а применение автоматизированных средств контроля в процессе обработки деталей в составе оборудования приводит к отсутствию контрольных ячеек внутри АПС. От принятой системы управления и степени ее автоматизации зависит включение в компоновку управляющих устройств (диспетчерских пультов, систем ЧПУ, средств сбора и передачи информации, ЭВМ различного уровня).

Основные факторы, влияющие на состав элементов компоновки, т. е. на структуру технических средств:

- форма специализации участка, цеха;
- тип оборудования;
- особенности транспортно-накопительной и складской системы (наличие межоперационных заделов, работа по принципу склад—рабочее место, автоматизация межоперационной передачи изделий);
- особенности системы инструментного обеспечения (жесткое оснащение станка, комплектование магазина на складе);
- особенности системы контроля (виды контроля, применяемые средства);
- особенности системы уборки стружки (механизированно-ручная, автоматизированная);
- тип и принципы системы управления (локальное управление компонентами системы, групповое управление оборудованием, комплексно автоматизированное управление).

Схемы расположения элементов АПС также зависят от характера

производственного процесса и конкретных производственных условий (наличия производственных площадей, размещения АПС в цехе, расположения коммуникаций).

При определении структуры технических средств должен реализовываться системный подход к анализу и синтезу АПС как сложных технических систем (СТС). Системный анализ включает:

- классификацию АПС по признаку сложности;
- формулирование (выделение) системных свойств АПС;
- введение понятий структур АПС как способов организации внутрисистемных связей;
- формирование критериев эффективности функционирования АПС.

Результаты анализа совместно с соответствующими базами данных используют для последующего структурного синтеза автоматизированных систем. В базах данных хранится информация о классификации объектов производства, групповых ТП, конструктивно-технологических параметрах оборудования, компоновочных решениях АПС и т. д. Эффективность работы с базами данных при принятии решений напрямую зависит от степени использования информационных технологий как при системном анализе, так и при системном синтезе структур АПС.

Синтез конкретной структуры предполагает ее выделение из множества возможных вариантов с использованием критериев эффективности функционирования АПС, сформированных на стадии системного анализа. Для оценки результатов синтеза структуры проводится математическое моделирование работы спроектированной АПС с последующим анализом результатов моделирования.

Ввиду сложности решаемых задач и большого объема перерабатываемой информации при анализе и синтезе структур АПС целесообразно использовать методы поискового конструирования, обеспечивающие выбор структуры автоматизированной системы по заданным критериям (прямая задача) и определение области ее рационального применения по известным параметрам (обратная задача).

В зависимости от принятого разделения производственного процесса различают АПС с предметной (в том числе предметно-замкнутой) и с технологической формами специализации. В предметно-замкнутых системах полностью или частично изготавливают одно или группу изделий, в системах с технологической специализацией выполняют отдельные виды работ для широкой номенклатуры изделий.

На предметно-замкнутых участках выделяют зоны оборудования с ЧПУ и зоны оборудования с ручным управлением. Различают также зоны предварительной, основной и окончательной обработки. В зо-

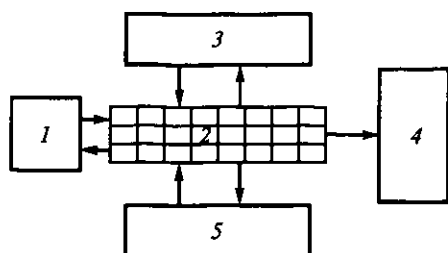


Рис. 2.17. Вариант компоновки предметно-замкнутого участка:
1 — зона подготовки баз; 2 — автоматизированный склад; 3 — зона станков с ЧПУ; 4 — цеха-потребители; 5 — зона станков с ручным управлением

нах предварительной и окончательной обработки применяют в основном оборудование с ручным управлением.

На рис. 2.17 представлен вариант компоновки предметно-замкнутого участка, где зоны обработки деталей на станках с ЧПУ и ручным управлением разделены автоматизированным складом. Внутри зон может быть предусмотрена межоперационная передача деталей. Аналогичную компоновку могут иметь участки с технологической формой специализации, где в зонах 3 и 5 выполняются определенные виды работ на однотипном оборудовании для различных изделий.

На предметно-замкнутых участках в связи с различным временем $T_{\text{шт}}$ по операциям появляется необходимость создания межоперационных заделов и, следовательно, размещения магазинов-накопителей внутри производственной системы. Варианты расположения магазинов-накопителей на участке представлены на рис. 2.18.

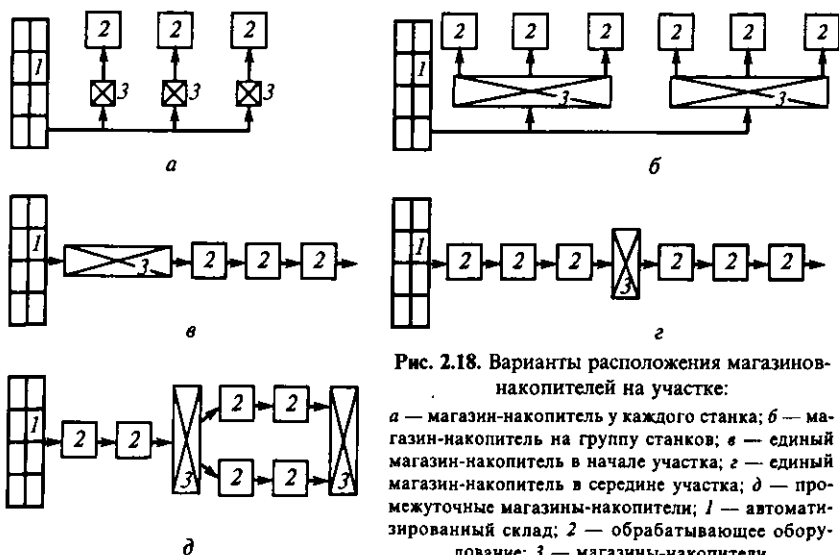


Рис. 2.18. Варианты расположения магазинов-накопителей на участке:

а — магазин-накопитель у каждого станка; б — магазин-накопитель на группу станков; в — единый магазин-накопитель в начале участка; г — единый магазин-накопитель в середине участка; д — промежуточные магазины-накопители; 1 — автоматизированный склад; 2 — обрабатывающее оборудование; 3 — магазины-накопители

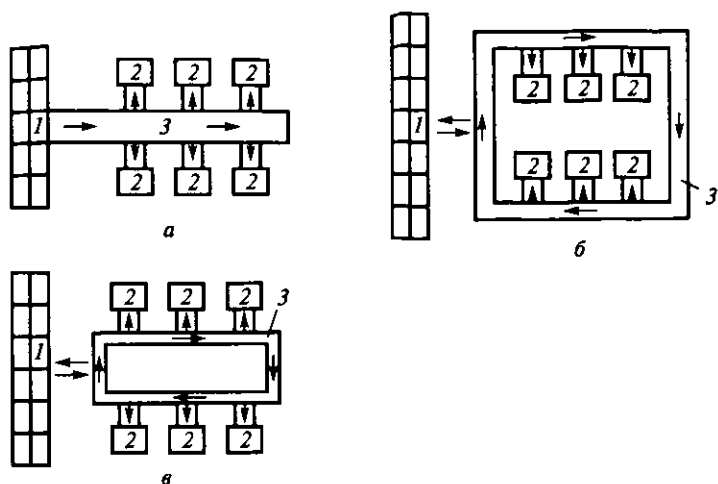


Рис. 2.19. Схемы транспортных систем:

а — линейная; б и в — круговые; 1 — автоматизированный склад; 2 — модуль, обрабатывающий центр, станок с ЧПУ; 3 — транспортная система

Транспортная система может быть локальной и единой для всего подразделения. По расположению различают линейные и круговые транспортные системы (рис. 2.19). Расположение оборудования внутри зон обработки такое же, как и в обычных подразделениях: последовательное, параллельное, смешанное.

При применении приспособлений-спутников в компоновке участка необходимо предусмотреть погрузочно-разгрузочные позиции или станции для установки и съема деталей и приспособлений. Расположение этих позиций или станций на участке зависит от принятой системы обеспечения обрабатывающего оборудования деталями в приспособлениях-спутниках и соотношения времени обработки деталей на станке и времени установки-снятия детали.

Если установка производится на складе, то погрузочно-разгрузочные позиции располагают в отделении склада (рис. 2.20, з). При большом времени $T_{\text{маш}}$ и относительно малом $T_{\text{всп}}$ (время установки-снятия) обеспечивают погрузочно-разгрузочные позиции всех станков участка через общий накопитель (рис. 2.20, а) или непосредственно подают детали к рабочим местам. В этом случае к каждому рабочему месту детали в приспособлениях доставляют либо с помощью транспортной системы непосредственно на станки (рис. 2.20, в), либо в накопители к каждому рабочему месту, либо в накопители для групп станков (рис. 2.20, б). При определенном соотношении $T_{\text{маш}}$ и $T_{\text{всп}}$ возможна установка погрузочно-разгрузочных позиций на группу станков внутри подразделения (рис. 2.20, з).

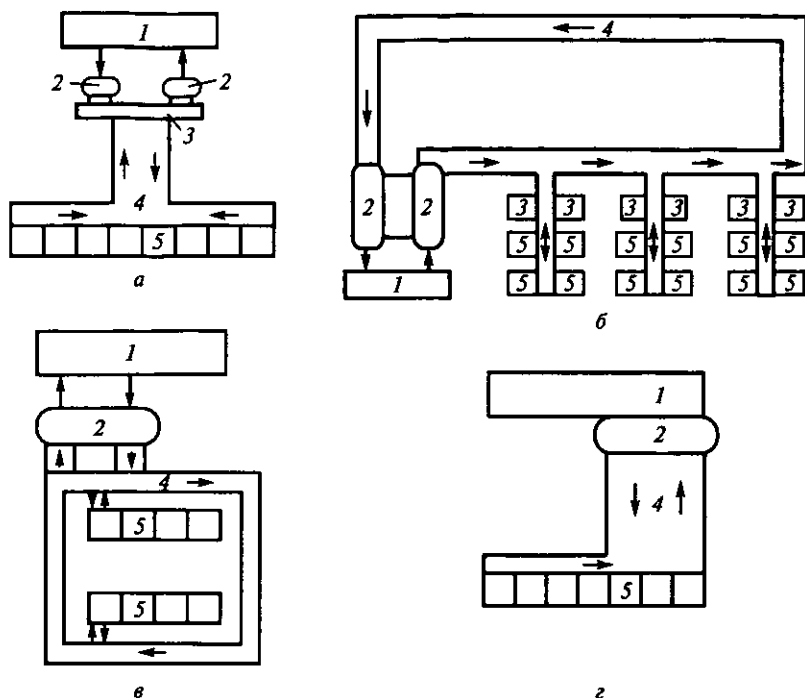


Рис. 2.20. Варианты схем расположения погрузочно-разгрузочных позиций в производственных системах:

1 — автоматизированный склад; 2 — загрузочно-разгрузочное устройство (станция); 3 — накопитель; 4 — транспортная система; 5 — обрабатывающее оборудование

В зависимости от принятой формы организации производства, разработанного ТП обработки и сборки изделий, уровня его производительности, гибкости и автоматизации выделяют три основные группы компоновочных схем АПС.

К первой группе относят АПС, организованные по принципу участков для мелко- и среднесерийного производств с автоматизацией транспортно-складских операций. В состав таких АПС включают станки с ЧПУ для изготовления закрепленной за системой номенклатуры изделий, а также универсальное или специализированное оборудование, не оснащенное ЧПУ.

На рис. 2.21 показана переналаживаемая система для обработки корпусных деталей в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства. Основные операции, производимые в системе: фрезерование, растачивание, развертывание, нарезание резьбы. Заготовки подаются в спутниках специальным устройством. Запас спутников

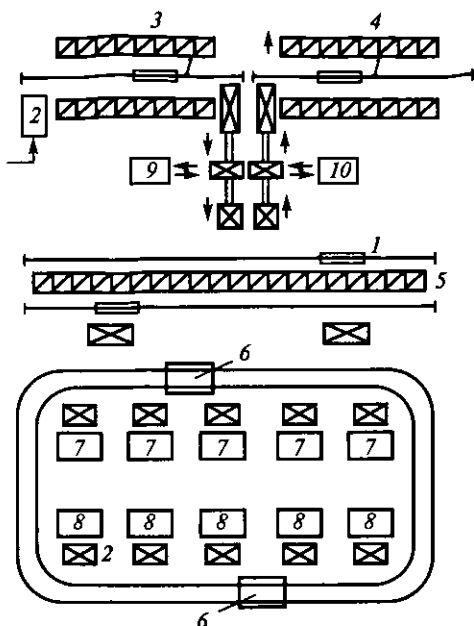


Рис. 2.21. Компонновка гибкой системы для обработки корпусных деталей (мелкосерийное производство):

1 — кран-штабелер; 2 — загрузочно-разгрузочная станция; 3 — автоматический склад заготовок; 4 — автоматический склад готовых деталей; 5 — промежуточный склад спутников и деталей; 6 — автоматическая транспортная тележка с блоком памяти; 7 — фрезерные станки с ПУ; 8 — обрабатывающие центры; 9 — устройство для закрепления и установки деталей в спутник; 10 — демонтаж спутников с деталями

с деталями временно хранится на складе материалов. Спутник с деталью подается на обрабатывающий центр по команде из центра управления. Применяют групповое управление станками ЭВМ. Обработанные детали снимают со спутников на линии демонтажа и автоматически помещают на складе готовых деталей.

Во вторую группу входят специализированные АПС для обработки или сборки небольшой группы конструктивно-однородных изделий с незначительными отличиями в элементах конструкции и способах их соединения в условиях крупносерийного производства. Причем номенклатура изготавливаемых изделий стабильна и, как правило, известна при создании системы. В состав таких АПС могут входить специализированное обрабатывающее и сборочное оборудование, агрегатные многошпиндельные станки с ЧПУ, оборудование, оснащенное многошпиндельными насадками. Передача деталей между станками при последовательной обработке может осуществляться с помощью конвейера, а загрузка-разгрузка оборудования — манипулятором с механическим приводом. Каждый станок системы стремятся спроектировать так, чтобы обеспечить условие $T_{\text{всп}} \rightarrow \min$.

К третьей группе относят широкоуниверсальные АПС, предназначенные для обработки мелких серий разнородных деталей с изменяющейся номенклатурой. Такие системы должны обеспечивать возмож-

ность перехода на производство новых деталей без остановки производства, снижение затрат на технологическую оснастку, сохранение работоспособности при частичном выходе из строя оборудования и высокую степень загрузки оборудования. Поэтому в этих АПС применяют, как правило, однотипные станки с широкими технологическими возможностями.

В состав АЦ, как АПС более высокого уровня организационной структуры производства, входят АЛ и (или) АУ, предназначенные для изготовления изделий заданной номенклатуры. Эта номенклатура значительно шире, чем номенклатура изделий, изготавливаемых на отдельных АЛ и АУ, что и является основной причиной объединения переналаживаемых АЛ и АУ в общую цеховую структуру. Графически это объединение представляют в виде компоновочного плана (схемы) цеха, на основе которого в дальнейшем разрабатывают планировку оборудования. Назначение компоновочного плана — взаимная увязка входящих в состав цеха линий, участков, отделений, выбор оптимального направления производственного процесса с кратчайшими путями перемещения объектов и средств производства, рациональными схемами материальных и информационных потоков.

Компоновка неразрывно связана с принятой формой организации производства и общим потоком производственного процесса в цехе. Так как АУ и АЛ представляют собой автономные производственно-технологические АПС и организационно-технические структуры (ОТС), то объединяющим фактором для них является наличие единой транспортно-складской системы (как правило, автоматизированной) и автоматизированной системы организационно-технологического управления (АСУ ОТ). При определении состава АЦ механообработки и сборки основным требованием является обеспечение законченного цикла изготовления изделий заданной номенклатуры и объема.

В механических цехах многономенклатурного мелкосерийного производства с преобладанием предметно-замкнутых участков предусматривают их расположение в соответствии с принятой структурой транспортно-складской системы; состав входящих в цех участков определяется видом и характером производства. Для сборочных цехов мелко- и среднесерийного производства характерно разделение на узловую и общую сборку со специализацией автоматизированных рабочих мест (крупные, средние, мелкие узлы и т. д.).

В механосборочных цехах средне- и крупносерийного производства, для которых характерны поточные линии различных типов (в том числе и автоматизированные), принято располагать линии вдоль пролетов цеха, а позиции сборки (общей и узловой) — перпендикулярно направлениям потоков линий механообработки.

2.7. Экономическая эффективность автоматизации производства

Основные критерии экономической эффективности автоматизации

Оценка средств и методов автоматизации по экономической эффективности является более обобщенной, чем оценка по отдельным техническим характеристикам. Сравнивая различные варианты новых автоматизированных систем по их экономической эффективности, выбирают наилучший. Сравнивая принятый вариант по экономическим показателям с действующим производством, можно определить целесообразность замены и модернизации последнего. С учетом показателей технико-экономической эффективности уточняют производственные характеристики с проектированной АПС.

Основными критериями технико-экономической эффективности создаваемых и внедряемых АПС являются следующие.

1. Годовой экономический эффект $\mathcal{E}_r$ от применения АПС. При определении эффективности различают:

- предварительный экономический эффект. Определяется для выявления целесообразности проектирования автоматизированных участков, т. е. при составлении технического задания на проектирование;
- ожидаемый экономический эффект. Рассчитывается на стадии разработки технического и рабочего проекта;
- фактический экономический эффект. Определяется на стадии внедрения проекта в производство.

2. Срок окупаемости $T_{ок}$ дополнительных капитальных вложений.

3. Капитальные вложения потребителя K .

4. Себестоимость годового объема продукции C .

Годовой экономический эффект

$$\mathcal{E}_r = (Z_1 - Z_2) = (C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2), \quad (2.24)$$

где $\mathcal{E}_r$ — годовой экономический эффект от применения АПС; Z_1 — приведенные затраты потребителя по базовому варианту, рассчитанные на годовой объем продукции, производимой при использовании АПС; Z_2 — приведенные затраты потребителя при использовании АПС; C_1 — себестоимость по базовому варианту, рассчитанная на годовой объем продукции, производимой при использовании АПС; C_2 — себестоимость годового объема продукции, производимой АПС; E_n — нормативный коэффициент эффективности (прибыли); K_1 — капитальные вложения потребителя по базовому варианту; K_2 — капитальные вложения потребителя при использовании АПС.

Эффективность будет иметь место в случае положительной разницы приведенных затрат ($З_1 > З_2$).

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений

$$T_{ок} = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2} \quad (2.25)$$

Капитальные затраты как по базовому, так и по проектируемому варианту должны учитывать:

- стоимость оборудования, специального инструмента, приспособлений и оснастки, средств контроля и диагностики оборудования;
- затраты на доставку и установку оборудования;
- стоимость проектных работ, включая разработку управляющих программ;
- стоимость производственных и служебно-бытовых помещений.

Расчетный срок окупаемости не должен превышать нормативный:

$$T_{ок} \leq [T_{ок}],$$

где $[T_{ок}]$ — нормативный срок окупаемости капитальных вложений; для автоматизированных систем (линий, участков, комплексов) $[T_{ок}] = 6-7$ лет.

Себестоимость годового объема продукции

$$C = f(U)$$

зависит от текущих затрат на выпуск продукции U , включая годовую зарплату работающих, затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования и др.

Принятый вариант АПС должен обеспечивать высокую эффективность капиталовложений, снижение себестоимости выпускаемой продукции и повышение ее качества, а также уменьшение срока окупаемости дополнительных капиталовложений.

Оценка экономической эффективности различных ступеней автоматизации производства

Оценку эффективности различных ступеней автоматизации производят по одним и тем же критериям, приведенным выше. При этом сохраняются и общие условия проведения расчетов:

- выбор исходной базы в зависимости от поставленной задачи;
- приведение сравниваемых вариантов в сопоставимый вид по всем показателям-признакам, кроме признака, эффективность которого определяют;
- определение исходных данных по данным уже освоенного производства со стабильными параметрами.

Несмотря на единую методологию, при определении экономической эффективности внедрения различных средств автоматизации учитывают их особенности. Например, при оценке эффективности АЛ необходимо учитывать их простои по видам и влияние простоев на эксплуатационные расходы. При расчете эффективности внедрения ПР учитывают повышение ритмичности производства, увеличение коэффициента сменности оборудования, повышение стабильности качества продукции, улучшение условий труда и снижение травматизма работающих. При оценке эффективности станков с ЧПУ учитывают снижение потерь от переналадки оборудования и от связывания оборотных средств в незавершенном производстве. При расчете экономической эффективности объединения станков с ЧПУ и ПР в роботизированные комплексы учитывают повышение коэффициента сменности основного и вспомогательного оборудования, уменьшение вложений в оборотные средства и количества обслуживающего персонала, сокращение всех видов простоев, в том числе на переналадку, за счет рациональной организации и управления производством с использованием автоматизированных систем управления технологическими процессами АСУ ТП.

Определение отдельных составляющих технологической себестоимости требует более полного учета фактических условий эксплуатации и прежде всего загрузки оборудования.

Перед началом организационно-технологического проектирования АПС определяют условие экономической целесообразности разработки проекта:

$$C_o \leq K_{o.6a3} K_{yв.ст},$$

где $K_{o.6a3}$ — капитальные затраты на оборудование в базовом варианте; $K_{yв.ст}$ — коэффициент допустимого увеличения стоимости АПС.

Данные для определения $K_{yв.ст}$ приведены в табл. 2.9.

Основными факторами, влияющими на экономическую эффективность АП, являются: состав, стоимость и производительность оборудования, степень использования оборудования, степень автоматизации производства и управления, номенклатура деталей, концентрация операций, количество и стоимость оснастки, количество рабочих, состав производственного и обслуживающего персонала, преимущество производства, стабильность выходных параметров, сроки освоения производства, наладка оборудования.

При расчете эффективности АПС более высокого организационного уровня, состоящей из отдельных автоматизированных систем (модулей, линий, участков), рекомендуется определять эффективность каждой составляющей системы и суммировать полученные результаты.

Определение коэффициента допустимого увеличения стоимости $K_{у.ст}$

Организационно-технологические параметры	Автоматизированные комплексы		
	Загрузка деталей	Смена инструмента	Загрузка деталей и смена инструмента
Простые детали:			
малая партия	1,57–2,36	1,56–2,34	2,49–3,74
большая партия	1,47–2,21	1,43–2,14	1,65–2,49
Сложные детали:			
малая партия	1,5–2,26	1,83–2,14	3,01–4,51
большая партия	1,4–2,1	1,58–2,37	1,76–2,64

Примечание. Простые детали: $T_{\text{элл}} = 3$ ч; $T_{\text{спл}} = 10...15$ мин (смена спутников и инструмента); обработка деталей — за один установ инструментами не более десяти наименований. Сложные детали: $T_{\text{элл}} = 4...15$ ч; $T_{\text{спл}} = 15...80$ мин обработка деталей — за четыре установка инструментами 60 наименований. Малая партия — детали изготавливают 1...2 месяца. Большая партия — детали изготавливают 3 месяца и более.

В условиях рыночной экономики происходит подмена экономических (производственных) категорий коммерческими (финансовыми), что имеет целью свести экономическое обоснование новой техники, в частности автоматизированного оборудования, к показателям прибыльности (рентабельности). В этих условиях расчеты экономической эффективности внедряемых АПС строят не столько на базе снижения текущих расходов производства (себестоимости) и различных сумм единовременных затрат (K), сколько на базе прибыли, какими бы способами она (прибыль) ни возникала (как в сфере производства, так — особенно — и в сфере обращения). Это дает возможность в системе финансов суммировать (сопоставлять) выплаты и поступления независимо от их источников, хотя, строго говоря, экономика не допускает сложения в чистом виде текущих расходов с единовременными затратами.

Так, при рыночном расчете абсолютной эффективности капиталовложений (выплат) инвестируемые суммы сравниваются с поступлениями, полученными не только за счет снижения себестоимости продукции, в течение некоторого периода времени, пока сумма выплат не будет возмещена суммой поступлений. Единственное, что учитывается при этом, это *дисконтирование* поступлений, а также (при расчете сравнительной финансовой эффективности капиталовложений) *альтернативные* варианты, или издержки утраченных возможностей (эффективность несостоявшихся или отвергнутых при сравнении вариан-

тов вложений средств — выплат). Наиболее часто для расчета эффективности новой техники применяются следующие методы:

- расчет «чистой дисконтированной стоимости»;
- расчет «внутренней нормы окупаемости»;
- полного возмещения (pay-off).

Вопросы для самопроверки

1. Из какого оборудования могут быть созданы АПС?
2. Какие виды АЛ применяются в различных типах производства?
3. Чем отличаются линии с гибкой связью от линий с жесткой связью?
4. Что такое производительность машины, производственной системы? Как определяется фактическая производительность?
5. Что такое баланс производительности? Какова методика его построения?
6. Объясните связь надежности с производительностью.
7. Как выбирают оборудование для автоматизированной обработки типовых деталей?
8. Как производят подбор и группирование деталей, обрабатываемых в условиях переналаживаемого автоматизированного производства?
9. Чем отличается ПР от автооператоров?
10. Какие условия учитывают при выборе ПР?
11. Что такое циклограмма функционирования?
12. В чем заключается методика построения циклограмм функционирования роботов и роботизированных ячеек?
13. Для чего предназначены магазинные и бункерные загрузочные устройства? Каковы их различия?
14. Какие виды транспортных устройств используют в АПС?
15. Что входит в состав технических средств автоматизированных транспортных систем?
16. Какие виды складов используют в условиях АП?
17. Назовите особенности работы инструмента в условиях АП.
18. Для чего необходимо кодирование инструментов на многооперационных станках с ЧПУ?
19. Какими методами осуществляют настройку инструментов на станках?
20. В чем смысл подналадки инструмента на станке?
21. Что такое приспособления-спутники? Для чего они предназначены?
22. Назовите основные факторы, определяющие выбор компоновки АПС.
23. Охарактеризуйте три основные группы компоновочных схем АПС.
24. Как располагают участки в цехах серийного и массового производства?
25. Перечислите основные факторы, влияющие на экономическую эффективность АПС.
26. В чем заключается основное условие экономической целесообразности разработки проекта АПС?
27. Назовите особенности оценки экономической эффективности различных ступеней АП.

3.1. Экономические и социальные аспекты надежности

Несмотря на разнообразие станков, формирование показателей надежности происходит по общим законам, что является основой для оценки и прогнозирования надежности при создании производственных систем.

Надежность — важнейший показатель качества изделий — должна обеспечиваться на всех стадиях жизненного цикла машин (проектирования — изготовления — эксплуатации). Из-за низкой надежности затраты на ремонт и техническое обслуживание машин превышают их начальную стоимость в несколько раз (у автомобилей — до 6, у станков — до 8 раз).

Низкий уровень надежности технологического оборудования не позволяет обеспечить эффективность производственных процессов, высокую производительность и качество выпускаемой продукции. Кроме того, низкий уровень надежности приводит к тяжелейшим последствиям (аварии, гибели людей и дорогостоящей техники).

Экономическая эффективность технологического оборудования (станки, роботы, модули) обусловлена прежде всего уровнем надежности (рис. 3.1). Общий баланс эффективности использования станков с ЧПУ складывается из нескольких составляющих:

1. Затраты (расходы) на изготовление станка $P_{\text{н}}$ и обслуживание при эксплуатации $P_{\text{о}}$ (отрицательные).

2. Прибыль $P_{\text{с}}$, получаемая от станка (положительная). Эффективность станка $P_{\text{э}} = P_{\text{с}} - (P_{\text{н}} + P_{\text{о}})$. Фактический экономический эффект (т. е. прибыль $P_{\text{э}}$) отличается от теоретической $P_{\text{т}}$ по ряду причин, в том числе из-за низкой надежности (отказов, простоев станка), в результате чего возрастают затраты на ремонт и обслуживание (кривая $P_{\text{о}}$ на рис. 3.1).

За счет получаемой прибыли $P_{\text{с}}$ затраты на изготовление $P_{\text{н}}$ окупаются за время $T_{\text{ок}}$ (период окупаемости), когда величина окупаемости $P_{\text{ок}}$ станет равной сумме затрат на изготовление $P_{\text{н}}$ и затрат на обслуживание $\frac{dP_{\text{о}}}{dt_{\text{о}}}$, т. е. когда $P_{\text{ок}} = (P_{\text{н}} + \frac{dP_{\text{о}}}{dt_{\text{о}}})$. Например, при $P_{\text{ок}} = 160$ тыс. руб., $P_{\text{н}} = 150$ тыс. руб. и $\frac{dP_{\text{о}}}{dt_{\text{о}}}$ затраты на обслуживание за период $T_{\text{ок}} = 10$ тыс. руб.

Максимальный эффект $P_{\max}$ получают при $T_{\text{эф}} = 4$ года. Предельный срок эффективной работы станка $T_{\text{пр}} = 9$ лет, когда $P_c = 450$ тыс.руб. и $P_n = (150 + \frac{dP_o}{dt_n})$, при этом $\frac{dP_o}{dt_n} = 300$ тыс.руб.

Оснащение станков с ЧПУ системами диагностики позволяет повысить коэффициент эффективного использования (за счет снижения числа отказов, остановов, простоев), получить прибыль $P_d > P_c$ и эффект $P_n^a > P_n$, хотя стоимость $P_n^a > P_n$. Максимальный, стабильный эффект $P_{\max}^a$ можно получать в течение длительного периода эксплуатации (от 4 до 10 лет, см. рис. 3.1).

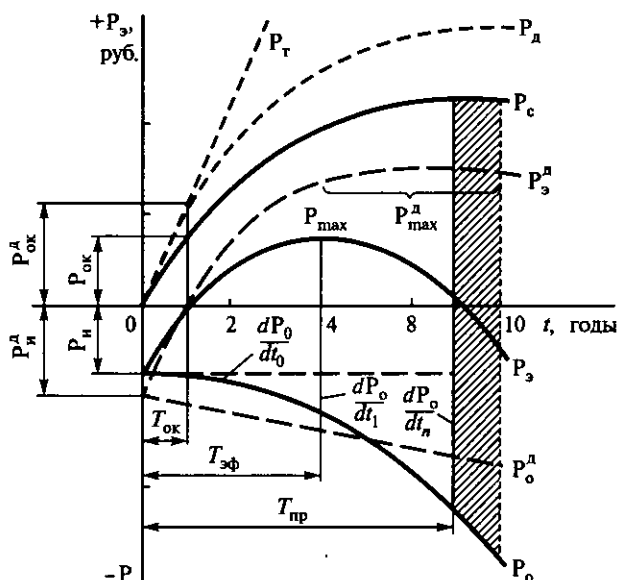


Рис. 3.1. Зависимость эффективности использования P , станков с ЧПУ от уровня их надежности

Состояния объекта и физический смысл понятий в области надежности

Термины и определения по надежности стандартизованы. Объект (машина, станок, модуль) может находиться в одном из следующих состояний: исправном, неисправном, работоспособном, предельном (рис. 3.2).

Работоспособное состояние (работоспособность) — состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям нормативно-технической документации. Машина может находиться в рабо-

тоспособном, но неисправном состоянии (например, из-за вмятин и царапин на корпусе).

Надежность — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования. Надежность является одним из основных показателей качества изделий, проявляющимся во времени и отражающим изменения, которые происходят в машине на протяжении всего времени ее эксплуатации. В машиностроении рассматривают надежность изделий: станок, узел, агрегат, комплекс и даже отдельная деталь или элемент. Надежность состоит из сочетания нескольких свойств: безотказности, долговечности, ремонтопригодности, сохраняемости.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Физика отказов и их особенности

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта. Различают восемь видов отказов: внезапный, постепенный, зависимый, независимый, перемежающийся, конструкционный, производственный, эксплуатационный. По физическому смыслу и специфике проявления особый интерес представляют внезапный и постепенный отказы.

Внезапный отказ (ВО) — отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений лимитирующего параметра; отказ функционирования, приводящий к внезапному останову машины или нарушению нормального режима работы (шум, удары, вибрации, нагрев). Особенностью ВО является то, что ему не предшествует направленное изменение параметров, поэтому его нельзя прогнозировать, например сгорел предохранитель, сломалось сверло, сломался зуб шестерни (рис. 3.3, а).

Постепенный (или износный) отказ — отказ, характеризующийся постепенным изменением значений параметров объекта, а также наличием тенденции (или закономерности) их изменения во времени, что позво-



Рис. 3.2. Схема основных состояний объекта:

1 — повреждение; 2 — отказ; 3 — переход объекта в предельное состояние (из-за износа, старения, потери точности, снижения эффективности); 4 — восстановление; 5 — ремонт

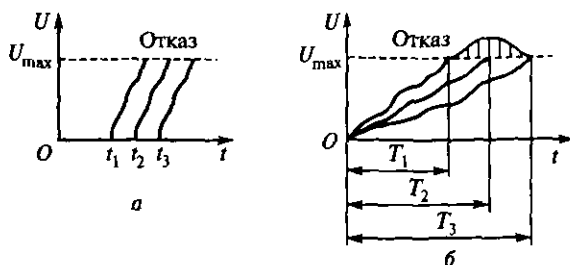


Рис. 3.3. Схемы возникновения отказов:
а — внезапный; б — постепенный (износный)

ляет их прогнозировать. Например, из-за износа направляющих станков не обеспечивает параметры точности формы или прямолинейность. Износ станков можно рассчитать, например, за период $T_1, \dots, T_3$ (рис. 3.3, б).

Показатели оценки надежности

Различают три специфических аспекта надежности:

1. Фактор времени (оценивается изменение начальных параметров в процессе эксплуатации станка).
2. Прогнозирование поведения станка с точки зрения сохранения его выходных параметров (показателей надежности).
3. Случайный (вероятностный) характер отказов, процессов, параметров и показателей.

Эта специфика отражена в показателях надежности. Основным показателем безотказности изделия является вероятность безотказной работы $P(t)$ — вероятность того, что в заданном интервале времени $t_i = T$ не возникнет отказа (рис. 3.4). Значение $P(t)$ находится в пределах $0 \leq P \leq 1$.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $F(t)$ образуют полную группу событий:

$$P(t) + F(t) = 1.$$

Допустимые значения $P(t)$ устанавливаются в зависимости от целевого назначения изделий или экономической целесообразности:

в авиации — $P_1(t) = 0,9999$ (близка к единице, отказ в течение ресурса T_p недопустим);

у станков с ЧПУ $P_2(t) = 0,99$ (с диагностикой $P_3(t) = 0,999$).

При совместном действии постепенных и внезапных отказов (рис. 3.5) значение вероятности безотказной работы $P(t)$ подсчитывают по теореме умножения вероятностей:

$$P(t) = P_v(t)P_n(t).$$

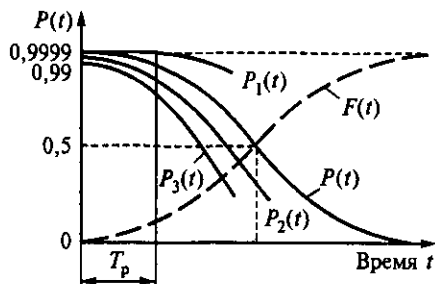


Рис. 3.4. Зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ изделий от времени эксплуатации

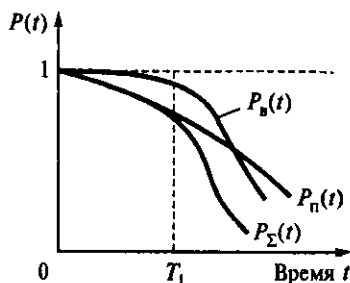


Рис. 3.5. Зависимость вероятности безотказной работы от одновременного действия внезапных и постепенных отказов

Внезапные отказы, как правило, подчиняются экспоненциальному закону.

Для оценки надежности применяют статистические методы, т. е. накапливают статистику по отказам, строят гистограммы и определяют показатели (рис. 3.6).

Параметр потока отказов $\omega(t)$ также является показателем, который характеризует их частоту. Перспективными направлениями оценки надежности являются специальные методы моделирования (аналитическое прогнозирование, метод Монте-Карло и др.).

Для оценки безотказности станков с ЧПУ можно применять коэффициент надежности

$$K_n = \frac{\delta}{\delta - \delta_n} > 1,$$

где δ — допуск на обработку; δ_n — запас (резерв) станка по точности обработки.

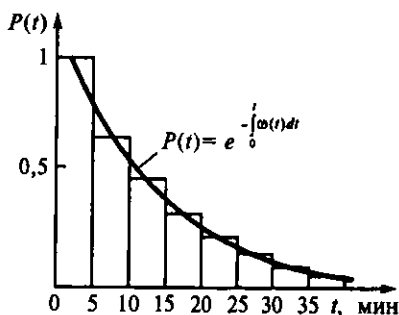


Рис. 3.6. Статистический метод оценки надежности

3.2. Связь надежности с производительностью

Элементы, обуславливающие надежность и производительность ТП

Технологический процесс на концептуальном уровне представляет собой сложную систему элементов пяти видов связей: размерных, временных, информационных, свойств материалов, экономических (рис. 3.7).

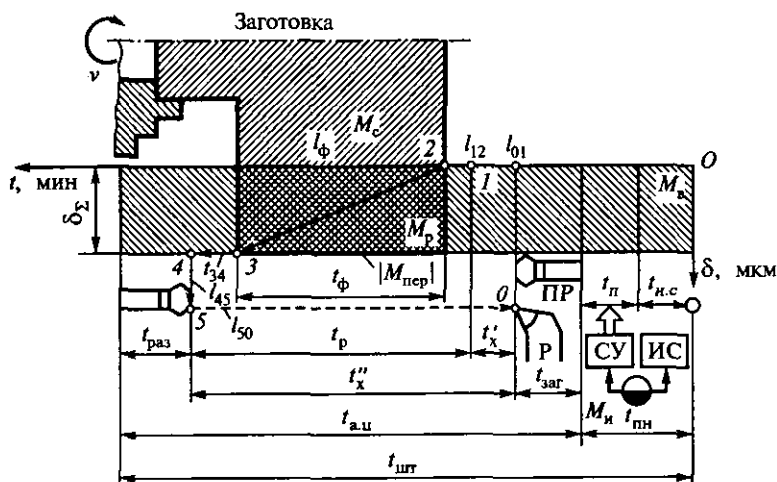


Рис. 3.7. Элементы технологической системы и параметры, обуславливающие надежность и производительность станков с ЧПУ:

ИС — инструментальная система; СУ — система управления; ПР — промышленный робот; Р — резец; $t_{ин}, t_{от}, t_{инт}, t_{заг}, t_{ин}^i, t_{от}^i, t_{инт}^i, t_{заг}^i, t_{от}^i, t_{инт}^i, t_{заг}^i$ — время наладки и смены инструмента, пуска, пусконаладочное, загрузки, холостых ходов, формообразования, рабочих ходов, разгрузки, автоматического цикла, штучное; δ_{Σ} — суммарная погрешность обработки; $t_{01} \dots t_{50}$ — участки траекторий в цикле

Производительность ТП обусловлена состоянием и уровнем надежности всех элементов технологической системы (ИС, СУ, Р, ПР, станок).

Технологический процесс можно интерпретировать графически: схематично (рис. 3.8, а); с помощью кругов Вена (рис. 3.8, б) в виде обобщенного множества M^* :

$$M_n = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n);$$

$$M_{\alpha} = (t_{\alpha\alpha}, t_{\alpha\beta}, t_{\alpha\gamma}, t'_{\alpha}, t_{\alpha\delta}, t_{\alpha\epsilon}, t_{\alpha\zeta}, t_{\alpha\eta});$$

$$M_{\omega} = (Y\Pi, L, G, M, \mathfrak{E});$$

$$M_c = (C_{11}, C_{12}, \dots, C_{1m});$$

$$M_3 = (P_{оп}, P_{уп}, P_{изк}, Q),$$

где M_n, M_p, M_h, M_c, M_s — соответственно множества, отражающие пять

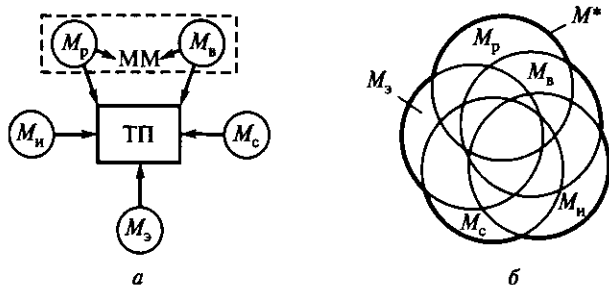


Рис. 3.8. Графическая интерпретация ТП с учетом пяти видов связей:

а — схематично; б — с помощью кругов Вена

видов связей: размерных, временных, информационных, свойств материалов, экономических; $\delta_1 \dots \delta_n$ — погрешности обработки; $t_{ис}$, $t_{п}$, $t_{заг}$, t_x , t_p , $t_{раз}$, $t_{а.у}$, $t_{шт}$ — время наладки и смены инструмента, пуска, загрузки, холостых ходов, рабочих ходов, разгрузки, автоматического цикла, штучное; УП — команды станку; L — траектория; G — подготовительные команды; M — вспомогательные команды; Э — команды электроавтоматики; $C_{заг}$, $C_{и}$, $C_{пр}$ — свойства заготовки, инструмента, прочие; $P_{оп}$, $P_{шт}$, $P_{штк}$ — себестоимость операции, штучная, штучно-калькуляционная; Q — производительность.

Параметры множеств M_p , M_b , M , широко используют в математических моделях (ММ) при решении задач технологии, теории производительности, оценки эффективности и др. Станок должен обеспечивать требуемую точность при заданной производительности. Погрешности обработки образуются в течение всего периода $t_{шт}$, поэтому элементы множества M_p полностью входят в множество M_b (рис. 3.9). В период t_ϕ есть взаимодействие элементов множества M_b с элементами $\delta_1, \dots, \delta_n$ множества M_p , в результате чего получаем пересечение, т. е. $|M_{пер}^{M_p, M_b}| = \emptyset$ — «непустое множество».

Из всего баланса времени обработки $t_{шт} = \sum_{i=1}^8 t_i$ производительным является только время формообразования t_ϕ (см. рис. 3.7.).

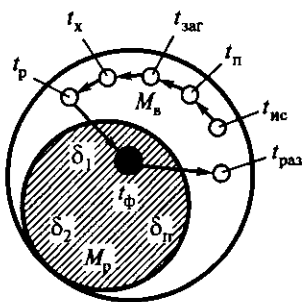


Рис. 3.9. Взаимодействие элементов двух видов связей — множеств M_p и M_b

Специфика формирования показателей надежности и их связь с производительностью

Надежность и производительность станков с ЧПУ зависят от работоспособности многих узлов и механизмов. При этом следует учитывать воздействие трех основных источников: энергии окружающей среды; внутренней энергии (от рабочего процесса); потенциальной энергии, которая накоплена в деталях машины в процессе изготовления.

При работе станка действуют различные виды энергии (механическая, тепловая, химическая, электромагнитная), которые порождают вредные процессы, ухудшающие начальные параметры изделия (рис. 3.10). По скорости протекания различают процессы быстропротекающие, средней скорости и медленные.

Быстропротекающие процессы действуют в течение долей секунд (вибрации, динамические процессы). Процессы средней скорости дей-

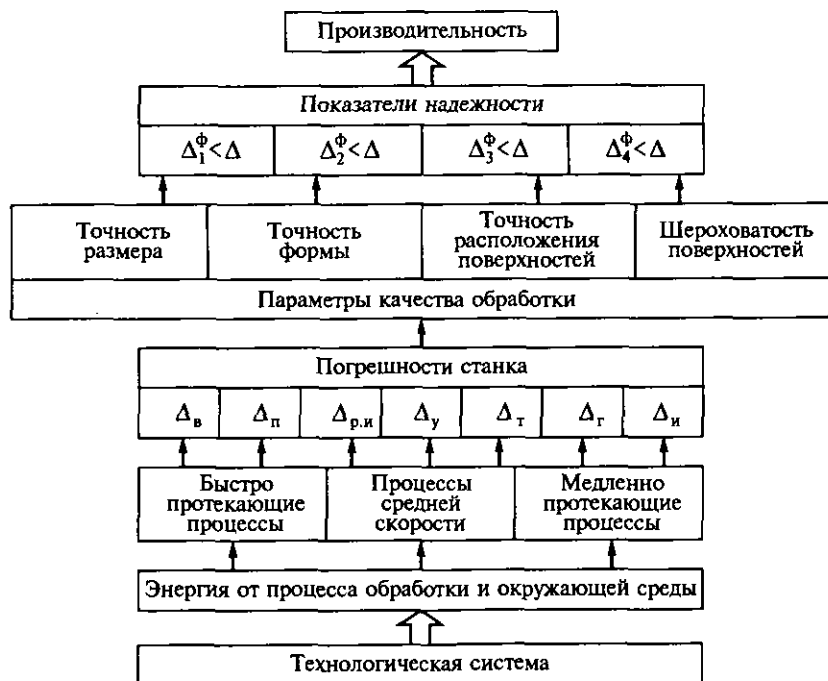


Рис. 3.10. Обобщенная структурная модель формирования показателей надежности и производительности станков с ЧПУ:

$\Delta_v, \Delta_p, \Delta_n, \Delta_r, \Delta_y, \Delta_t, \Delta_g, \Delta_i$ — погрешности от вибраций, износа режущего инструмента, позиционирования, от тепловых, упругих и геометрических деформаций, из-за износа станка соответственно

ствуют в течение минут и часов (т. е. в межналадочный период) — это тепловые деформации, износ режущих инструментов. Медленные процессы действуют в течение длительного времени (месяцы, годы) и приводят к износу деталей и потере точности. Указанные процессы приводят к погрешностям ($\Delta_{\phi}, \Delta_{p.n.}, \Delta_n, \Delta_r, \Delta_t, \Delta_y, \Delta_n$), которые ухудшают параметры качества обработки. Когда фактические значения параметров качества $\Delta_1^{\phi} \dots \Delta_4^{\phi}$ достигнут установленных предельных значений Δ , произойдет отказ по точности. Частота отказов и время их устранения влияют на производительность и эффективность оборудования.

Из-за отказов снижается коэффициент технического использования η_r , а следовательно, — и фактическая производительность Q_{ϕ} :

$$Q_{\phi} = \frac{1}{T_p + \Sigma T_{пр}} = \frac{1}{(t_p + t_x + t_{всп}) + (\Sigma T_c + \Sigma T_{орг} + \Sigma T_{пер})}; \quad (3.1)$$

$$\eta_r = \frac{T_p}{T_p + \Sigma T_c}, \quad (3.2)$$

где $t_p, t_x, t_{всп}$ — время рабочих ходов, холостых ходов, вспомогательное; $\Sigma T_c, \Sigma T_{орг}, \Sigma T_{пер}$ — потери времени (простои) из-за станка, организационных причин, переналадок; T_p — время рабочее; $\Sigma T_{пр}$ — суммарное время простоев.

Коэффициент технического использования η_r численно равен доле времени работы станка при условии обеспечения ее всем необходимым (без учета организационных простоев).

Время простоев станка из-за отказа равно

$$\Sigma T_c = t_{п.н} + t_{y.н} + t_n. \quad (3.3)$$

Здесь $t_{п.н}, t_{y.н}, t_n$ — время поиска неисправностей, устранение неисправностей, пусконаладочные работы. Значения η_r лежат в диапазоне $0 < \eta_r < 1$. При высокой степени надежности станков, т. е. при $P(t) \approx 0,999 \rightarrow 1$, значения $K_{т.н}$ также стремятся к единице:

$$\lim_{\Sigma T_c \rightarrow 0} \eta_r = \frac{T_p}{T_p + \Sigma T_c} \rightarrow 1. \quad (3.4)$$

Зависимость показателей надежности и производительности от времени эксплуатации станков

Все показатели надежности и производительности являются функциями времени, носят случайный характер, изменяются при эксплуатации станков в результате действия различных погрешностей и факторов (износа, коррозии, старения, короблений, разрегулирования и др.). При эксплуатации станков можно выделить три характерных периода, кото-

рые имеют общие закономерности: период начальной эксплуатации N_0 ; период нормальной эксплуатации N_n ; период длительной эксплуатации N_d (рис. 3.11).

Период N_0 — период ввода в эксплуатацию нового станка (пуско-наладочные работы, регулировки, отработка режимов, обработка пробных деталей, определение технологических и точностных возможностей). Для этого периода характерны частые остановки, отказы, нестабильный ритм работы. Поэтому показатели $P(t)$ и $\eta_{\text{тех}}$ низкие, но со временем они возрастают. Кроме того, это период макроприработки (и обкатки) всех деталей и механизмов.

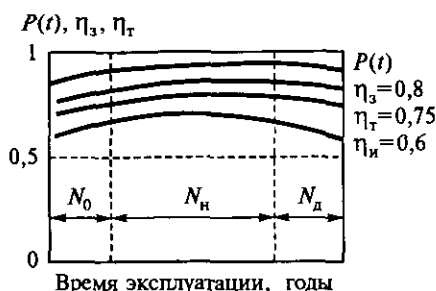


Рис. 3.11. Связь показателей надежности $P(t)$ и производительности η_z, η_t, η_n

Процессы, происходящие в станке и влияющие на его технические характеристики, бывают

обратимые (деформации узлов) или необратимые (изнашивание, коррозия). Все процессы влияют на характеристики станка, вызывают погрешности при функционировании, снижают качество и производительность технологического процесса. Изнашивание относят к необратимому процессу, приводящему к прогрессивному ухудшению функциональных характеристик станка во времени.

Износ начинается с приработки сопряжений. Приработка приводит к изменению геометрических характеристик качества поверхностей. В начальный период происходит интенсивное изнашивание неровностей трущихся поверхностей, их упругое и пластическое деформирование. В результате приработки происходит сглаживание наиболее выступающих элементов поверхностей, частичное или полное их уничтожение и установление новых, отличных от первоначальных по форме и размерам.

Реальные детали машин имеют кроме шероховатости поверхности отклонения формы в виде волнистости и макроотклонения. Из-за отклонения формы нет полного макроконтakta сопряжения, в результате чего происходит его макроприработка, которая является причиной интенсивного изнашивания деталей и быстрого изменения параметров функционирования. В результате приработки технологический микрорельеф превращается в эксплуатационный.

Период нормальной эксплуатации N_n — период, когда значения всех параметров машины удовлетворяют требуемым и обеспечивают стабильный, надежный ТП, показатели надежности и производительности высокие и лежат в заданных пределах.

Период длительной эксплуатации N_d — период, когда происходит моральное и физическое старение всех элементов технологической системы — станка, приспособлений, узлов, механизмов, деталей системы управления (из-за износа, старения, усталости, коррозии, изменения свойств). Частота отказов нарастает, расширяется их диапазон и разнообразность, увеличивается время восстановления работоспособности станка. Показатели надежности начинают ухудшаться, что приводит к снижению показателей производительности η_z, η_n, Q, T_p .

Рассмотрим два варианта зависимости показателей производительности от надежности.

Вариант 1. Период N_d ($\eta_z = 0,9$ и $\eta_n = 0,9$).

Коэффициент использования

$$\eta_n = \eta_z \eta_r = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81.$$

Производительность

$$Q = \eta_n Q_u = 0,81 Q_u.$$

Вариант 2. Период N_d ($\eta_z = 0,8$ и $\eta_n = 0,8$).

Коэффициент использования

$$\eta_n = \eta_z \eta_r = 0,8 \cdot 0,8 = 0,64.$$

Производительность

$$Q = \eta_n Q_u = 0,64 Q_u.$$

Таким образом, при снижении коэффициентов загрузки η_z и технического использования η_r всего на 0,1 (из-за понижения уровня надежности в период N_d) производительность Q снижается на 0,17 (с 0,81 Q до 0,64 Q).

Собственные внецикловые потери Σt_c обусловлены параметрами потока отказов ω и временем их восстановления τ_p , т. е. $\Sigma t_c = \omega \tau_p$. Для условий серийного производства влияние параметров надежности (потока отказов ω и времени восстановления τ_p) на фактическую производительность Q_f^c можно оценивать по формуле

$$Q_f^c = \frac{1}{T_u + \Sigma t_n} = \frac{1}{T_u + (\Sigma t_c + \Sigma t_{орг})} = \frac{1}{T_u + \omega \tau_p + \Sigma t_{орг}} \quad (3.5)$$

(потери на переналадку $\Sigma t_{пер}$ можно не учитывать).

Анализ последствий отказов

Для работающей технологической системы наиболее опасны внезапные отказы, т. е. отказы функционирования. Они непредсказуемы и могут привести к тяжелейшим последствиям:

- отказ по точности обработки (когда $\Delta_f > \Delta_{\text{доп}}$) приводит к браку;
- отказ функционирования, т. е. внезапный отказ станка, отдельного узла или детали. При этом могут возникать опасные ситуации: поломка режущего инструмента (авария и брак); поломка элементов механической части (узла, механизма, отдельной детали), что требует поиска и устранения неисправностей, а иногда и ремонта; неисправности в системе управления, которые трудно обнаружить сразу (сгорела плата, элемент, нет контакта и пр.).

Экономический ущерб из-за отказов проявляется в следующем: работа с ухудшенными параметрами; повышенные простои и трудозатраты на восстановление работоспособности; снижение производительности и эффективности. Для повышения надежности автоматизированных систем применяют специальные методы, хотя это требует дополнительных затрат.

3.3. Методы повышения надежности автоматизированных систем

Особенность проблемы надежности состоит в том, что она комплексная и связана со всеми этапами жизненного цикла изделия. Надежность является одним из основных показателей качества изделий. Уровень надежности формируется и обеспечивается на всех стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации.

Стадия проектирования. На этой стадии применяют ряд способов создания надежных конструкций:

1. Выбор рациональных и эффективных принципов действия и схем построения машин.
2. Создание избыточности и резервирование.
3. Научно-техническое и экономическое обоснование выбранных материалов, параметров, величин допусков.
4. Моделирование и прогнозирование работы технологических систем или отдельных элементов (расчет погрешностей, потери точности, усилий зажима заготовок в приспособлениях и схватах).
5. Оснащение специальными системами (контроля и диагностики за состоянием режущего инструмента и элементами ТС; адаптивными).
6. Использование статистических данных и опыта создания аналогичных конструкций.

При проектировании ТП важно заранее (априори) сделать прогноз о потере точности по всей цепи «чертеж — заготовка — деталь». Определить долю и степень влияния каждого элемента ТС на потерю точности (выявить доминирующие элементы).

Стадия изготовления. На данной стадии необходимо учитывать факторы, обеспечивающие надежность.

1. Выбор рациональных способов получения заготовок и методов обработки (приближение формы заготовки к форме детали, минимальные припуски).

2. Строгую технологическую дисциплину при изготовлении детали (исключение наследственности, концентраторов напряжений, внутренней потенциальной энергии).

3. Выбор эффективных методов термообработки. Применение эффективных упрочняющих технологий для повышения прочности и износостойкости (ионное азотирование, цементация, плазменное напыление и др.).

4. Высокое качество сборки и наладки.

Стадия эксплуатации. При эксплуатации на надежность и стабильность функционирования влияет ряд следующих факторов:

1. Применяемые смазки.

2. Применяемые СОЖ при обработке.

3. Применяемые режимы резания.

4. Условия эксплуатации оборудования (виброзащита, термоконстантные помещения).

Принятие решений на начальных стадиях проектирования

На этапе проектирования делают выбор структуры и расчет схемной надежности системы. Автоматизированные производственные системы (АПС) относят к сложным системам, на большое число выходных параметров которых устанавливают нормативы, обуславливающие надежность. Структура АПС относится к связанной, если отказ ее элементов является зависимым событием и влияет на функционирование всей системы (рис. 3.12). При последовательном соединении элементов отказ одного элемента приводит к отказу всей системы. Вероятность безотказной работы АПС равна произведению вероятностей безотказной работы всех ее элементов:

$$P(t) = P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6 = \prod_{i=1}^6 P_i. \quad (3.6)$$

При одинаковой надежности элементов $P(t) = P_i^n$. Недостатком последовательного соединения является низкая надежность всей системы (при достаточно высокой надежности отдельных элементов). Например,

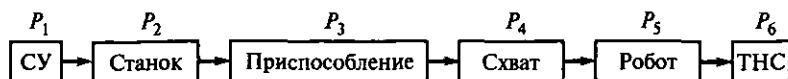


Рис. 3.12. Схемная структура АПС и ее основные элементы

при значении вероятности безотказной работы каждого элемента $P_i = 0,9$ надежность всей системы равна (см. рис. 3.12):

$$P(t) = P_i^n = 0,9^6 = 0,53.$$

При внезапных отказах вероятность безотказной работы элементов подчиняется экспоненциальному закону:

$$P_1 = e^{-\lambda_1 t}; P_2 = e^{-\lambda_2 t}; \dots; P_6 = e^{-\lambda_6 t}. \quad (3.7)$$

Тогда вероятность безотказной работы системы $P(t)$ рассчитывается по формуле

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t}, \quad (3.8)$$

где $\lambda_{\Sigma} = (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) = \sum_{i=1}^n \lambda_i$.

Избыточность и резервирование

Избыточность — основной метод повышения надежности сложных систем. На стадии проектирования систем предусматривается создание запаса по основным параметрам, обуславливающим надежность: прочности, жесткости, износостойкости, виброустойчивости, теплостойкости и др. В результате избыточности достижение предельных значений доминирующих параметров при работе изделия отодвигается. Наступление отказа как бы искусственно «сдвигается» во времени, т. е. в конструкции на стадии проектирования заранее закладывается завышенная наработка на отказ. При создании надежных систем принцип избыточности проявляется в том, что ресурс изделия устанавливают намного ниже среднего срока службы до отказа. Недоиспользование потенциальной долговечности изделия дает гарантию его безотказной работы.

Частным случаем избыточности является резервирование, т. е. создание и включение в схему АС дублирующих элементов. При выходе из строя (или отказе) одного из элементов дублер выполняет его функции и узел продолжает нормально функционировать. Резервирование значительно повышает надежность систем.

Есть два вида резервирования — с нагруженными и ненагруженными резервными элементами (рис. 3.13). При нагруженном резервировании резервные элементы постоянно присоединены к основным и находятся в одинаковом с ними режиме работы (рис. 3.13, а).

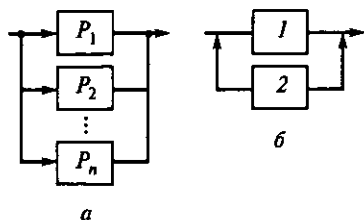


Рис. 3.13. Схема резервирования с нагруженным (а) и с ненагруженными (б) дублирующими элементами

В этом случае отказ системы — сложное событие, которое будет иметь место при условии отказа всех элементов. Вероятность появления одновременно всех отказов $F(t)$ по теореме умножения равна произведению:

$$F(t) = F_1 F_2 \dots F_n = \prod_{i=1}^n F_i. \quad (3.9)$$

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (3.10)$$

Если вероятность безотказной работы каждого элемента $P_i = 0,9$ и $n = 3$, то получим:

$$P(t) = \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \right] = \left[1 - \prod_{i=1}^3 (1 - 0,9) \right] = \left[1 - (0,1)^3 \right] = 0,999.$$

Таким образом, вероятность безотказной работы резко (на три порядка) повысилась. Используя принцип резервирования, возможно создавать надежные системы из ненадежных элементов.

При ненагруженном резервировании резервные цепи (элементы) находятся в отключенном состоянии и включаются лишь в случае отказа основной цепи (рис. 3.13, б). В этом случае надо вначале обнаружить отказ, а затем — включить резерв.

Повышение информативности

Стабильность процесса обработки определяется уровнем надежности элементов РТК. Повысить надежность можно за счет повышения информативности о состоянии отдельных элементов РТК (и точности выполнения заданных функций), используя специальные технические средства информации — датчики. Применяют датчики внутренней и внешней информации. Датчики внутренней информации используют для контроля за параметрами, обуславливающими надежность функционирования оборудования (станков с ЧПУ, роботов), — контроль температуры, давления, силы, вибраций и др. Датчики внешней информации бывают контактные (тактильные, силомоментные, проскальзывания) и бесконтактные (расстояния, обнаружения, системы технического зрения).

Тактильные датчики позволяют: определить момент соприкосновения схвата с деталью; получить информацию о силе и давлении при захвате детали схватом; регистрировать «проскальзывание» детали в схвате; определить наличие детали в накопителе; определить исходное положение схвата.

Повысить работу роботов, не допустить отказов и аварий можно за счет оснащения РТК датчиками внешней информации (рис. 3.14). Если усилие зажима детали схватом недостаточное, то происходит экстренный останов робота и опасная ситуация ликвидируется.

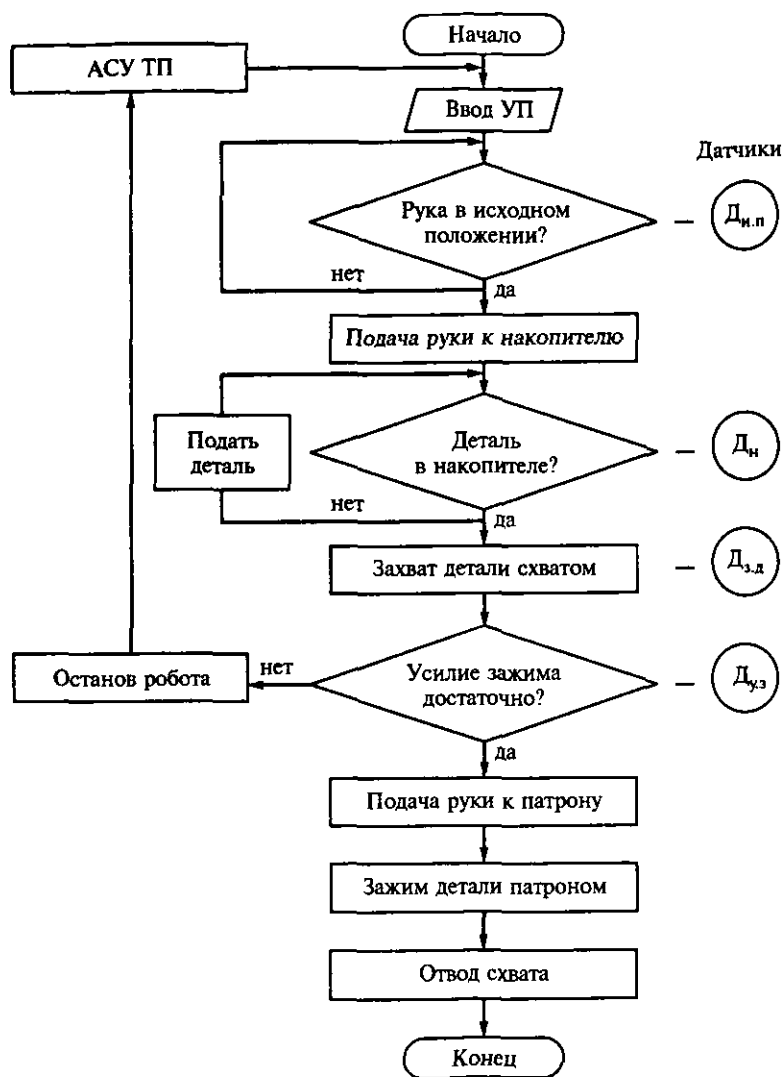


Рис. 3.14. Алгоритм функционирования робота с датчиками внешней информации и АСУ ТП:

$D_{и.п}$ — датчик исходного положения схвата; D_n — датчик наличия детали в накопителе;
 $D_{з.д}$ — датчик захвата детали; $D_{у.з}$ — датчик усилия зажима

Совершенствование структуры управления РТК

Отказ станка с ЧПУ приводит к браку или поломке (рис. 3.15). Повысить надежность станка и процесса обработки в целом можно, применив в структуре АСУТП датчики и повысив информативность о ходе процесса обработки. Датчики $D_{и.п}$ сигнализируют об изменении параметров станка с ЧПУ — системы управления (СУ) и технологической системы (ТС). Датчики $D_{п.с}$ сигнализируют о возникновении погрешностей станка. Датчики $D_{п.д}$ информируют АСУТП об изменении параметров

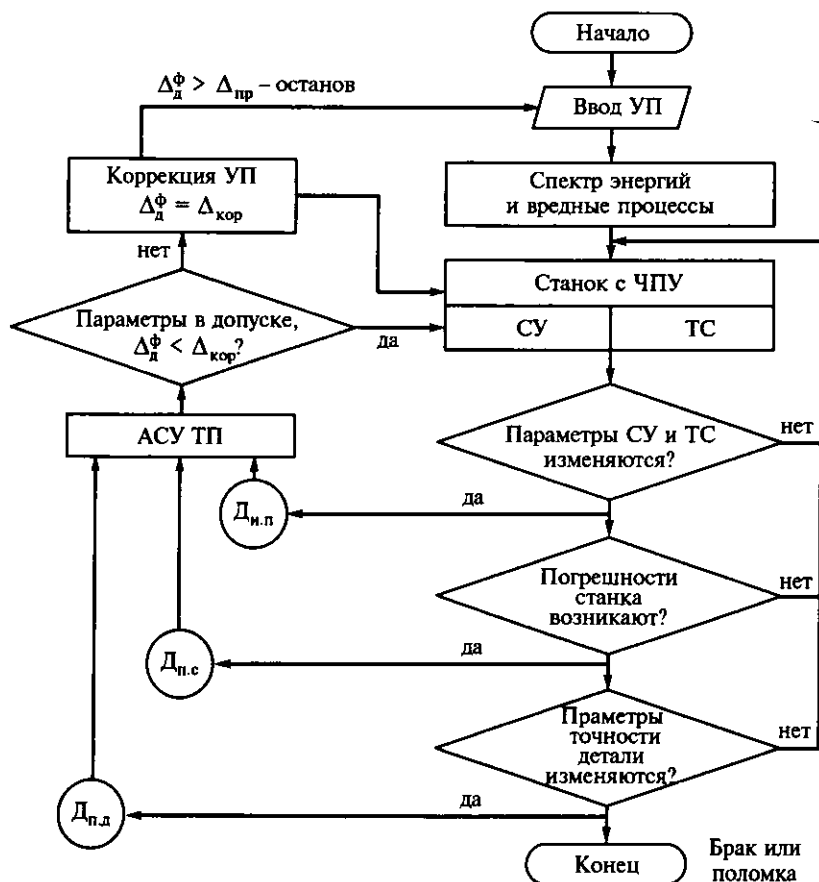


Рис. 3.15. Блок-схема алгоритма формирования отказа станка с ЧПУ:
 $D_{и.п}$ — датчик изменения параметров станка; $D_{п.с}$ — датчик возникновения погрешности станка;
 $D_{п.д}$ — датчик изменения параметров обрабатываемой детали

ров обрабатываемой детали. Если фактическая погрешность Δ_d^f достигает погрешности $\Delta_{\text{кор}}$, то вводится коррекция в УП. Если Δ_d^f становится равной предельно допустимому значению $\Delta_{\text{пр}}$, то производится экстренный останов станка, чтобы не допустить отказа по точности.

Повысить надежность робота можно за счет создания специальной организационной структуры его функционирования, предотвращающей аварии (рис. 3.16). Для этого при управлении роботом нужны дополни-

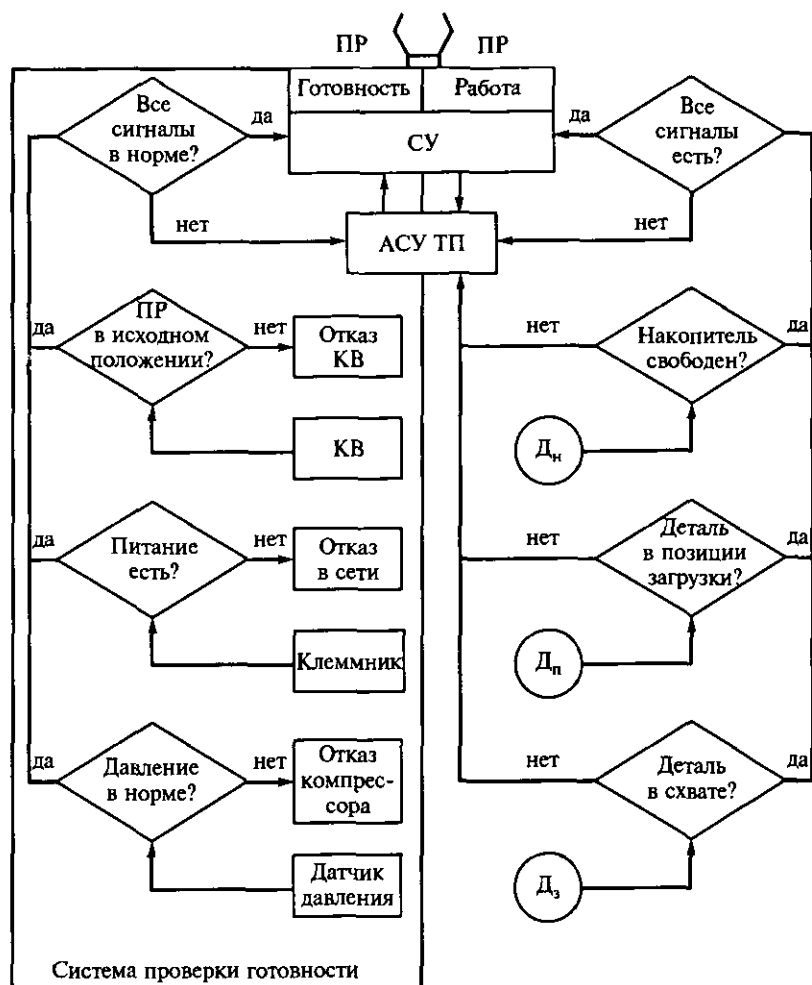


Рис. 3.16. Блок-схема алгоритма управления роботом в составе АСУ ТП (фрагмент):

D_n, D_p, D_z — датчики накопителя, позиции, захвата; КВ — конечный выключатель

тельные информационные потоки о состоянии основных элементов РТК (их положении и исправном состоянии, точности срабатывания и выполнения команд, соответствии параметров и норм). Для повышения надежности предусмотрена специальная система проверки готовности робота до начала его работы по программе. Это позволяет исключить нештатные и аварийные ситуации.

Повышение надежности функционирования транспортных систем

Автоматические транспортные системы и устройства в условиях АП представляют серьезную опасность при эксплуатации и требуют специальных методов повышения надежности и безопасности. Простейший метод повышения уровня надежности (и безопасности) транспортных систем (робокары, тележки, платформы) — это применение механических средств защиты совместно с системами электроавтоматики (рис. 3.17). Робокара Р оснащена датчиками касания D_1, D_2, D_3, D_4 для защиты при ударе с трех сторон. Корпус 1 датчика D_1 крепится к робокаре. При ударе о препятствие П (см. рис. 3.17, б) под действием силы F_n экран 5 (труба) перемещается влево вместе с плунжером 2. Срабатывает микровыключатель датчика D_1 . Для возвращения трубы 5 в исходное положение (вправо) предусмотрена пружина 4, крепящаяся к корпусу 1 винтом 3.

Для защиты робокары при ударе разработана электрическая схема автоматического управления и защиты (рис. 3.18). При включении автомата А замыкается цепь катушки пускателя прямого хода робокары (т. е. движения вперед) $P_{n.x}$ и замыкаются силовые контакты пускателя прямого хода $K_{n.x1}$ (+) и $K_{n.x2}$ (-). На двигатель М подается питание и

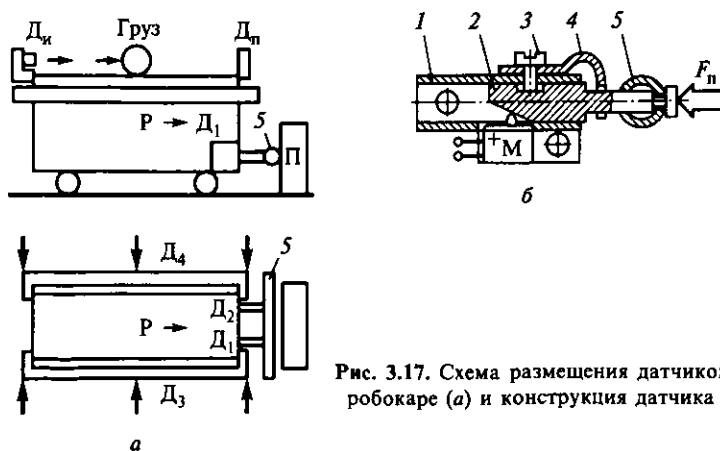


Рис. 3.17. Схема размещения датчиков на робокаре (а) и конструкция датчика (б)

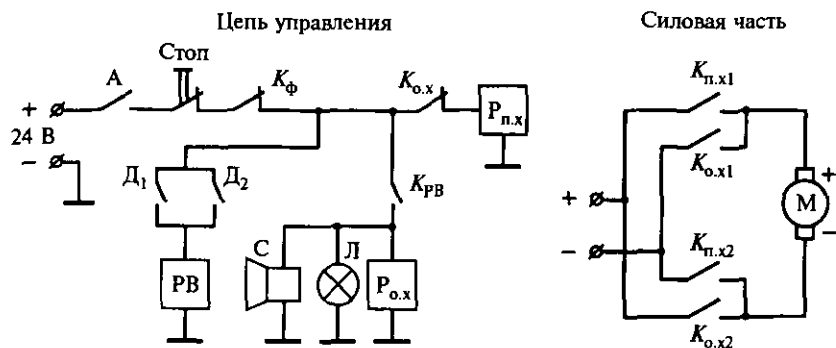


Рис. 3.18. Электрическая схема автоматического управления и защиты для управления робокарой и защиты при ударе

робокара начинает движение «вперед» по программе. При ударе о препятствие П срабатывает датчик D_1 или D_2 (или одновременно оба) и замыкается цепь катушки реле времени РВ. Реле включается, замыкаются контакты K_{PB} и включается катушка реле обратного хода $P_{o.x}$. Контакты $K_{o.x}$ разомкнутся и разомкнутся силовые контакты прямого хода $K_{п.х1}$ (+) и $K_{п.х2}$ (-). Одновременно включаются силовые контакты обратного хода $K_{o.х1}$ (+) и $K_{o.х2}$ (-). Полярность двигателя изменится. За счет противотока произойдет мгновенное торможение, а затем отскок робокары назад и останов. Величина отскока и время останова регулируются с помощью реле времени РВ. Предусмотрена аварийная сигнализация: звуковая — сирена С; световая — лампа Л.

Чтобы исключить падение заготовок с робокары, предусмотрена защита от перегрузок. Установлены фотодатчики: излучатель D_n и приемник D_n . При перегрузке («груз» на рис. 3.17, а) разомкнутся контакты фотодатчика K_Φ и робокара не включится.

Описанный принцип и устройство может иметь многофункциональное применение для защиты различных устройств, узлов, агрегатов автоматизированного производства (узлов, роботов, автооператоров, спутников, транспортеров, опасных зон и др.).

Создание конструкций повышенной надежности

Эффективным способом повышения надежности является создание надежных конструкций за счет применения оригинальных решений: нового принципа действия; новых компоновок; новых структурных схем построения; выбора, расчета и оптимизации параметров. На этих принципах разработано автоматическое зажимное приспособление повышенной надежности, представленное на рис. 3.19.

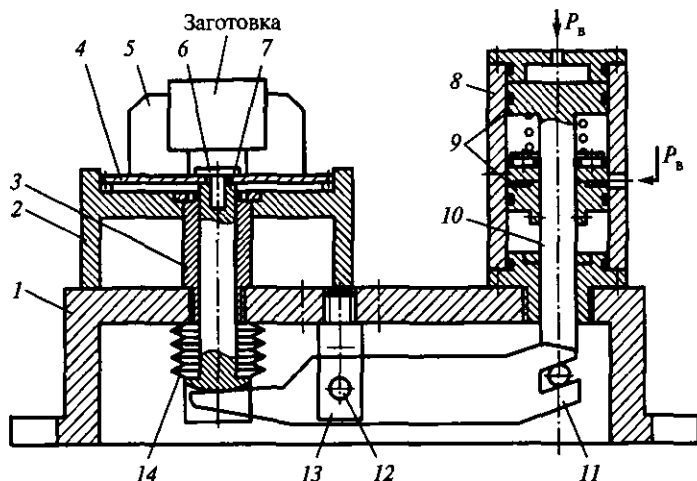


Рис. 3.19. Автоматическое зажимное устройство повышенной надежности:

1 — плита; 2 — корпус мембранного патрона; 3 — втулка; 4 — мембрана; 5 — кулачок; 6 — заглушка; 7 — толкатель; 8 — гильза; 9 — поршни; 10 — шток; 11 — коромысло; 12 — ось вилки; 13 — вилка; 14 — тарельчатая пружина

Приспособление предназначено для автоматического зажима заготовок при механической обработке или сборке. Плита 1 устанавливается на столе станка. Корпус 2 мембранного патрона втулкой 3 прижимается к плите. Заглушка 6 крепит мембрану 4 к толкателю 7. На мембране крепятся кулачки 5.

При подаче воздуха под давлением P_v поршни 9 двойного пневмоцилиндра перемещаются в гильзе 8 вниз. Шток 10 перемещается вниз, при этом правое плечо коромысла 11 движется вниз, а его левое плечо за счет поворота вокруг оси 12 вилки 13 движется вверх и толкателем 7 сжимает тарельчатые пружины 14. Толкатель 7 выгибает вверх мембрану 4, и кулачки 5 расходятся в сторону. Заготовка (или деталь) устанавливается между кулачков до упора. Воздух из полостей двойного пневмоцилиндра выпускается. Тарельчатые пружины разжимаются, толкатель 7 с мембраной 4 возвращается вниз. За счет силы тарельчатых пружин и мембраны происходит зажим заготовки кулачками. Повышенная надежность, точность и безопасность обеспечиваются за счет следующих факторов.

1. Применение принципа «обратного действия» для зажима заготовки. Заготовка удерживается не за счет давления воздуха пневмоцилиндра («прямое действие»), а за счет сил предварительно сжатых тарельчатых пружин и мембраны. Сила зажима при этом не зависит от перепада

давления воздуха в пневмосети (из-за обрыва в пневмосети, срыва давления).

2. Повышенная сила зажима за счет разницы плеч коромысла 11 (силу можно регулировать и увеличивать смещением вилки 13 — влево).

3. Компактность конструкции (особенно по высоте, так как цилиндр расположен не под патроном, а сбоку). За счет сдвоенного цилиндра уменьшен диаметр гильзы 8.

4. Пневмоцилиндр одностороннего действия (это упрощает конструкцию и повышает надежность).

Данный привод можно использовать и с другими зажимными устройствами — трехкулачковыми патронами, цанговыми зажимами.

Автоматическое захватное устройство повышенной надежности

Схват предназначен для захвата заготовок в автоматическом режиме (рис. 3.20). При подаче воздуха в полость цилиндра 8 поршень 10 движется влево и сжимает тарельчатые пружины 9. Рычаг 4 за счет сил пружин 5 разводит в сторону губки 3. Рука робота подается к детали, которая оказывается между губками. Затем из полости пневмоцилиндра сбрасывается давление. Под действием пружины 9 поршень 10 со штоком идет вправо. Усилие от пружины 9 передается через конус 13 на рычаги 4, которые давят на губки 3 и зажимают деталь.

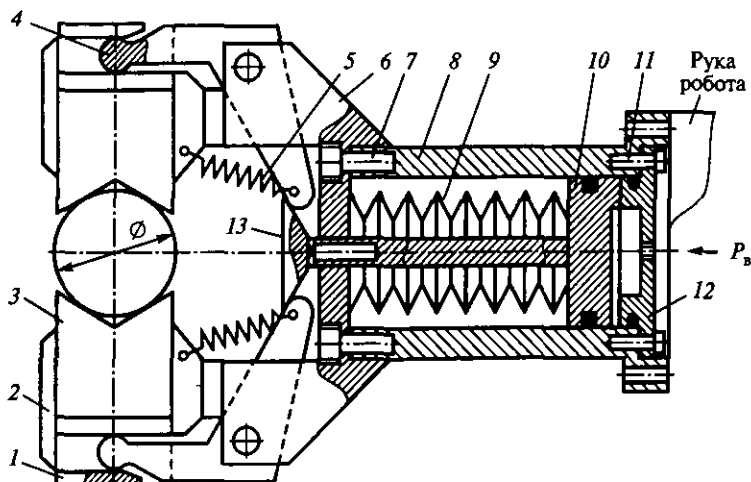


Рис. 3.20. Схват повышенной надежности и точности:

1 — крышка; 2 — обойма; 3 — губки; 4 — рычаг; 5 — пружина; 6 — кронштейн; 7, 11 — винт; 8 — пневмоцилиндр; 9 — пружина; 10 — поршень; 12 — заглушка; 13 — конус

Особенности и преимущества конструкции схвата.

1. Повышенная надежность и безопасность. Это обусловлено принципом «обратного» действия. Зажим осуществляется за счет потенциальной энергии сжатых пружин. Перепады и срывы давления воздуха не влияют на силы зажима и удержание детали.

2. Высокая жесткость конструкции. Нет «слабых» звеньев. Вероятность поломки деталей ничтожно мала.

3. Очень высокая точность при захвате деталей. Губки 3 находятся в одной плоскости, движутся только по прямой и не отклоняются от оси как при холостом, так и при рабочем ходе (т. е. при зажиме).

4. Простота. Правая часть цилиндра 8 имеет фланец, легко и быстро крепится к стандартному фланцу руки робота. Кронштейн 6 выполняет сразу несколько функций — закрывает левую сторону пневмоцилиндра 8, служит несущей конструкцией для рычагов 4 и для размещения губок 3. Простота сборки и наладки.

5. Мобильность. Быстрая смена губок.

6. Повышение технологических возможностей при захвате заготовок различных диаметров и длин за счет применения «сдвоенных» сменных губок с регулируемым диапазоном захвата.

Повышение уровня защиты роботов

Одно из направлений повышения надежности функционирования роботов — повышение уровня их защиты при возникновении опасных производственных ситуаций (ударах, наездах, ложных срабатываниях, сбоях). «Слабым звеном» (с точки зрения надежности) являются захватные устройства роботов. Оснащение роботов даже простейшими электромеханическими датчиками позволяет расширить технологические возможности, повысить информативность, надежность, безопасность, точность (рис. 3.21).

С помощью датчиков 1 и 2 можно повышать надежность и расширять технологические возможности роботов. Это позволяет осуществлять поиск захватываемых деталей при движении схвата как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Корпус 1 датчиков поиска крепится к схвату (рис. 3. 22). При касании шупа 6 детали Д происходит его поворот вокруг оси 3 и микровыключатель М срабатывает. Винт 4 слу-

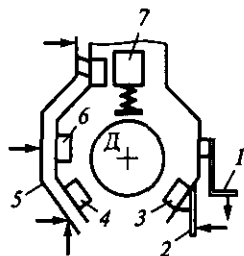


Рис. 3.21. Оснащение схвата датчиками безопасности:

1 и 2 — датчики поиска детали в накопителе; 3 — датчик контроля усилия зажима заготовки; 4 — датчик проскальзывания детали; 5 — датчик защиты схвата при ударе; 6 — датчик наличия детали в схвате (фотодатчик); 7 — датчик наличия детали в схвате (электромеханический)

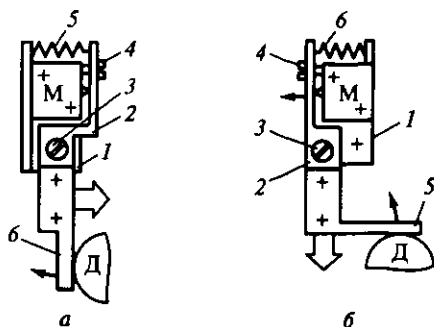


Рис. 3.22. Датчик поиска в горизонтальном (а) и вертикальном (б) направлениях:

1 — корпус; 2 — рычаг; 3 — ось; 4 — винт; 5 — пружина; 6 — щуп

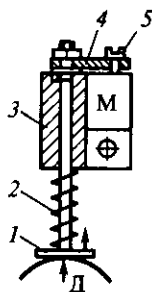


Рис. 3.23. Датчик контроля наличия детали в схвате:

1 — щуп; 2 — пружина; 3 — корпус; 4 — рычаг; 5 — винт тонкой настройки

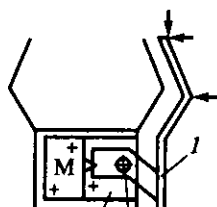


Рис. 3.24. Датчик защиты схвата при ударе сбоку и спереди:

1 — щуп; 2 — ось; 3 — корпус

жит для тонкой настройки датчиков. Пружина 5 удерживает рычаг 2 в исходном положении. На рычаге 2 предусмотрена смена щупов 6.

Датчик 7 (см. рис. 3.21) служит для контроля наличия детали Д в схвате (рис. 3. 23). При захвате детали Д щупа 1 движется вверх и микро-выключатель М срабатывает. Щуп установлен в корпусе 3 и пружиной 2 зафиксирован в крайнем (исходном) положении. На конце щупа 1 закреплен рычаг 4 с винтом тонкой настройки 5. В зависимости от диаметра захватываемых деталей Д щупы 1 можно изменять.

Для защиты схвата при ударе служит датчик 7 (см. рис. 3.21). При ударе сбоку или спереди щуп 1 поворачивается вокруг оси 2 и микро-выключатель М срабатывает (рис. 3.24). Корпус 3 датчика устанавливается на схвате, где наибольшая вероятность удара.

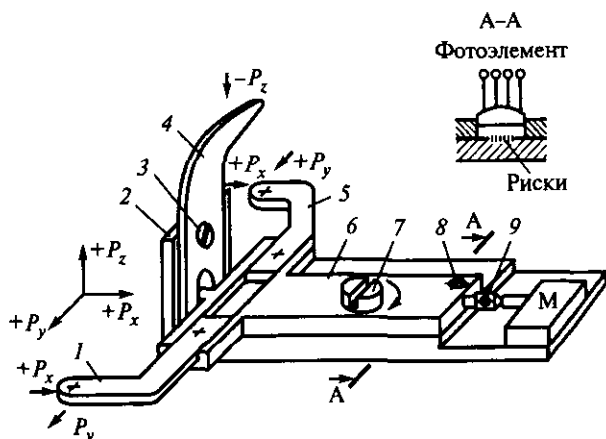


Рис. 3.25. Устройство автоматической защиты роботов при ударах спереди, сверху, с боков:

1, 4, 5 — щуп; 2 — корпус; 3, 7 — винт; 6 — пластина; 8 — фотоэлемент; 9 — конус

Датчики 1–7 можно использовать (кроме оснащения схватов) в различных устройствах технологических систем (в накопителях, в приспособлениях, транспортерах, в опасных зонах).

Повысить надежность роботов при ударах со всех сторон (спереди, сверху, с боков) можно с помощью специального устройства (рис. 3.25). Корпус 2 устройства крепится к роботу в местах вероятных ударов (схват, рука). При ударах сверху (щуп 4), спереди или с боков (щупы 4 или 5) поворачивают пластину 6 относительно оси 7 и микровыключатель М срабатывает. Конусом 9 можно осуществлять тонкую настройку срабатывания микровыключателя М.

Для повышения надежности устройства предусмотрено резервирование — в подвижной пластине 6 установлен фотоэлемент 8, чувствительность которого зависит от толщины рисков, нанесенных на неподвижной пластине (корпусе 2). Фотоэлемент является нагруженным резервом, так как постоянно присоединен к схеме защиты и находится в одинаковом режиме работы. Получаем систему с параллельно резервированными элементами. Если вероятность безотказной работы каждого элемента $P_i = 0,99$, то при $m = 2$

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i) = 1 - (1 - P_i)^2 = 1 - (1 - 0,99)^2 = 1 - (0,01)^2 = 0,9999 \approx 1.$$

Таким образом, за счет нагруженного резерва надежность устройства увеличилась в 100 раз и близка к 1.

Выбор оптимальных параметров шероховатости и повышение износостойкости

Надежность изделия зависит от эксплуатационных свойств обработанных поверхностей деталей. Износостойкость поверхностей зависит от многих факторов, в том числе от величины R_z (рис. 3.26). При очень гладкой поверхности смазка не удерживается на поверхности и износ

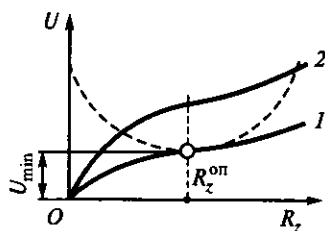


Рис. 3.26. Зависимость износа U от величины параметра шероховатости R_z .

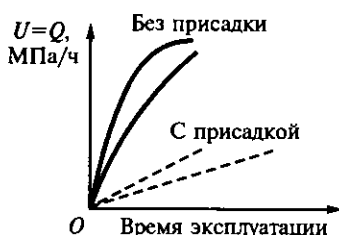


Рис. 3.27. Влияние присадок на старение смазки Q и износ U

протекает более интенсивно. При оптимальном значении $R_z^{\text{оп}}$ износ U поверхности минимален (кривая 1). При значениях шероховатости, отличных от оптимального (т. е. левее или правее точки $R_z^{\text{оп}}$), износ увеличивается (кривая 2).

Применение смазки может снизить износ в 1000 раз. Однако со временем смазка теряет свои свойства из-за поглощения кислорода Q (т. е. стареет). Поглощение кислорода Q (и износ U) протекает менее интенсивно при наличии в масле специальных противоизносных присадок (рис. 3.27).

Износостойкость зависит не только от свойств сопряженных материалов, но и от условий работы сопряжения. Выбранные материалы должны гарантировать, что на поверхности трения не возникнут недопустимые виды изнашивания, например молекулярное схватывание, которое приводит к задирам. Так, при трении однородных материалов в условиях несовершенной смазки для предотвращения молекулярного схватывания необходимо, чтобы их твердость отличалась не меньше чем на 10 единиц по Бринеллю.

Выбор методов упрочнения

В условиях ГАП роль и требования к инструментальной оснастке значительно возрастают. Режущий инструмент должен удовлетворять следующим требованиям: обеспечение высокой стойкости, удовлетворительное формирование и отвод стружки; высокая жесткость и виброу-

стойчивость; быстросменность при наладке или замене; точность обработки при заданной производительности.

Материал режущего инструмента должен обеспечивать: стабильность режущих свойств; повышенную общую и особенно размерную стойкость; прочность и надежность инструмента. Существует ряд путей реализации указанных требований: применение обладающих высокими режущими свойствами материалов; обеспечение мелкозернистой структуры сталей; обеспечение балла карбидной неоднородности (менее двух единиц) за счет многократной проковки и других способов; применение материалов, обладающих повышенной износостойкостью (сплавы с высоким содержанием титана Ti и низким содержанием кобальта Co); применение износостойких покрытий (азотирование, карбонитрация, лазерное легирование и др.). Для повышения износостойкости и прочности поверхностей деталей, штампов, режущих инструментов применяют специальные методы упрочнения: азотирование (ионное и печное); карбонитрация; цементация; покрытие нитридом титана; лазерное легирование; плазменное напыление.

Широко применяемый метод упрочнения деталей — цементация — имеет ряд существенных недостатков: нагрев до высокой температуры (950°C) и резкое охлаждение при закалке; большие деформации и припуски; обязательное шлифование (с предварительной правкой валов); удаление наиболее качественного упрочненного слоя; неравномерный съем металла и оставшийся упрочненный слой (одна из причин поломок и аварий); увеличение длительности и трудоемкости ТП; громоздкая установка для цементации.

Наиболее прогрессивным и эффективным является метод ионного азо-

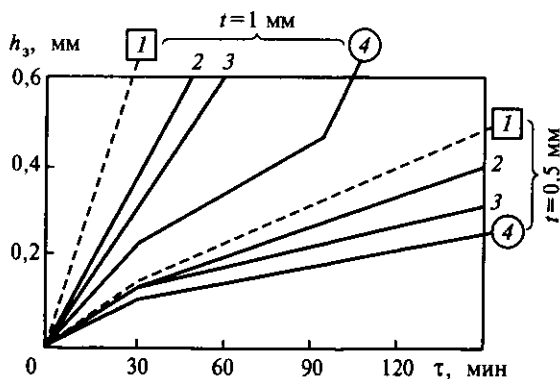


Рис. 3.28. Зависимость износа задней грани реза h_z при различных методах упрочнения:

1 — без упрочнения; 2 — нитрид титана; 3 — карбонитрация; 4 — ионное азотирование

тирования, который имеет ряд преимуществ: низкая температура (до 525° С); отсутствие деформаций; короткий цикл ионизации (2...24 ч); не требуется дальнейшей обработки поверхностей; сохранение верхнего упрочненного слоя; равномерность упрочненного слоя; компактность установки; простота эксплуатации; экологически чистый процесс. При упрочнении режущего инструмента методом ионного азотирования их стойкость значительно выше, чем при упрочнении другими методами (рис. 3.28.).

Новые концепции создания и повышения уровня надежности режущего инструмента АП

Для повышения надежности и эффективности АП нужен новый тип режущего инструмента, позволяющего вести высокоскоростную обработку (ВСО), в том числе и высокопрочных, жаропрочных, нержавеющей

Таблица 3.1

Перспективный режущий инструмент для автоматизированного производства

Технологические условия	Материал режущей части			
	Поликристаллы кубического нитрида бора (КНБ)			Режущая керамика
Марка материала инструмента	Композиты: 01; 10; 10Д	Киборит Композит 02	Ниборит	ВОК60; ВНК10 ОНТ-20
Обрабатываемый материал	Закаленные стали HRCэ 60...70	Жаропрочные стали	Коррозионно-стойкие стали	Углеродистые высоколегированные стали HRC 60
Скорость резания V, м/мин	80...150	200...450	120...300	140...400
Эффективность	Снижение трудоемкости в 3 раза	Повышение скорости резания		
		в 40 раз	в 2,5 раза	в 3 раза

Таблица 3.2

Повышение стойкости и надежности инструмента за счет выбора оптимального состава порошков

Марка стали с оптимальным составом порошков	Повышение стойкости по сравнению с быстрорежущими сталями		Тип инструмента
P6M5K5-МП	P6M5K5 — в 2 раза	P18 — в 4 раза	Резцы Сверла Фрезы Зенкеры Метчики Долбьки
P9M4K8-МП	P9M4K8 — в 2 раза	P18 — в 4 раза	
P12M3K5Ф2-МП	P12M3K5Ф2 — в 2 раза	P18 — в 5 раз	

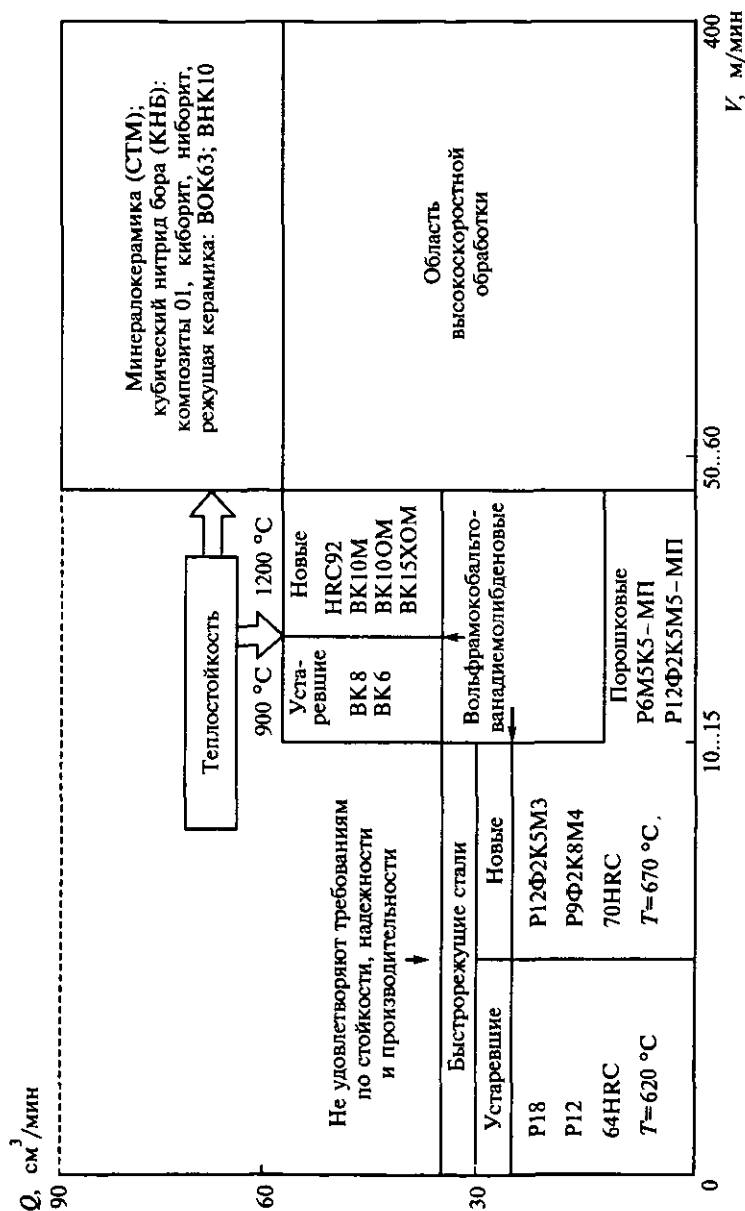


Рис. 3.29. Зависимость производительности Q от материала и режущих свойств инструмента (труднообрабатываемые стали)

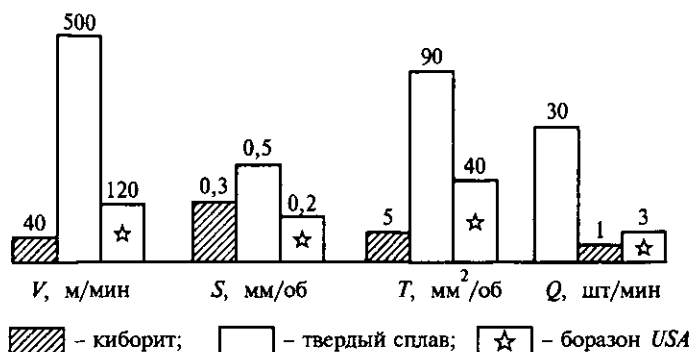


Рис. 3.30. Зависимость показателей V , S , Q , T от типа режущих инструментов при обработке жаропрочных сталей

щих, труднообрабатываемых сталей (рис. 3.29). В области ВСО силы резания уменьшаются на 30 % и стружка из сливной переходит в элементную, что важно для условий АП.

Применение новых сверхпрочных материалов позволяет значительно улучшить показатели эффективности процесса обработки на станках с ЧПУ: снижение трудоемкости в 3 раза; повышение скорости резания до 40 раз (табл. 3.1). Новые типы режущих инструментов обладают высоким уровнем теплостойкости — до 1200°С. Инструмент, оснащенный новыми сверхпрочными материалами, в десятки раз превосходит существующие отечественные (и зарубежные) образцы по основным параметрам — скорости резания, подаче, трудоемкости, производительности (рис. 3.30).

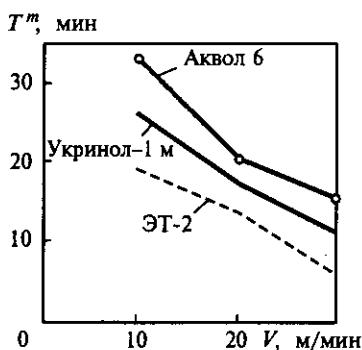


Рис. 3.31. Влияние типа СОЖ на стойкость режущего инструмента при обработке сталей

Стойкость и режущие свойства инструмента зависят от выбора состава порошков (табл. 3.2). В оптимальных составах содержание ванадия Φ не должно превышать 3 %. Например, инструмент из стали P12 Φ 5М не нашел практического применения, так как при содержании Φ более 3 % шлифуемость ухудшается в 2 раза.

Высокие режущие свойства, прочность, стойкость и надежность режущего инструмента из порошковых материалов достигается за счет комплекса факторов: самый высокий балл карбидной неоднородности (БКН = 0); легкошлифуемость;

отсутствие деформаций при термообработке; уменьшение зерен карбида (менее 1 мкм); стабильность свойств.

Надежность и стабильность процесса обработки зависит от применяемых СОЖ (рис. 3.31). При обработке жаропрочных сталей резцами с твердосплавными пластинами ВК-8 их стойкость повышается в 1,6 раза (по сравнению со стандартной СОЖ ЭТ-2). Применение новых видов СОЖ (В29⁶, В31, В32*, В35) позволяет значительно увеличивать стойкость (до 8 раз).

3.4. Стендовые испытания на надежность

Изделия машиностроения ответственного назначения перед эксплуатацией подвергают стендовым испытаниям на надежность, которые позволяют определить вероятность безотказной работы в заданный период времени, выявить наиболее слабые звенья и установить физические причины отказов. Однако следует иметь в виду, что такие испытания требуют значительных затрат времени и должны быть экономически оправданы. Поэтому часто объектом испытаний является не вся машина, а лишь ее отдельные узлы или детали, т. е. элементы конструкции, которые оказывают доминирующее влияние на надежность машин.

В зависимости от характера нагружения испытываемых узлов и деталей создают и применяют самые различные стенды. Например, для испытания подшипников качения используют стенд, кинематическая схема которого приведена на рис. 3.32, а. На вращающийся в подшипниках 5 вал 2 установлены две пары подшипников. Одна пара в узле радиального нагружения 4, а две другие пары в узле осевого нагружения 1. Нагрузка на подшипники регулируемая и создается гидравлическими цилиндрами 3.

На рис. 3.32, б приведена кинематическая схема стенда для исследования износостойкости пары винт—гайка, часто применяемых в станках. Винт 1 получает ускорение при вращении, сдвигает и раздвигает гайки 2 и 4, между которыми установлена пружина 3, и создает в паре винт—гайка требуемую нагрузку. Гайки установлены на основании 5, которое удерживает их от проворота.

На рис. 3.32, в приведена кинематическая схема стенда для испытания на термическую усталость материала валков, применяемых в прокатных станах. От электродвигателя 9 через редуктор 8, вариатор для регулирования скорости 7 и червячный редуктор 6 вращение передается на испытуемый образец 2 (или модель прокатного валка), который устанавливается в захвате 5. При вращении часть образца окунается в воду (пассивное охлаждение) и продолжает охлаждаться струями воды 3 (активное охлаждение), затем нагревается от индуктора 4. Таким образом,

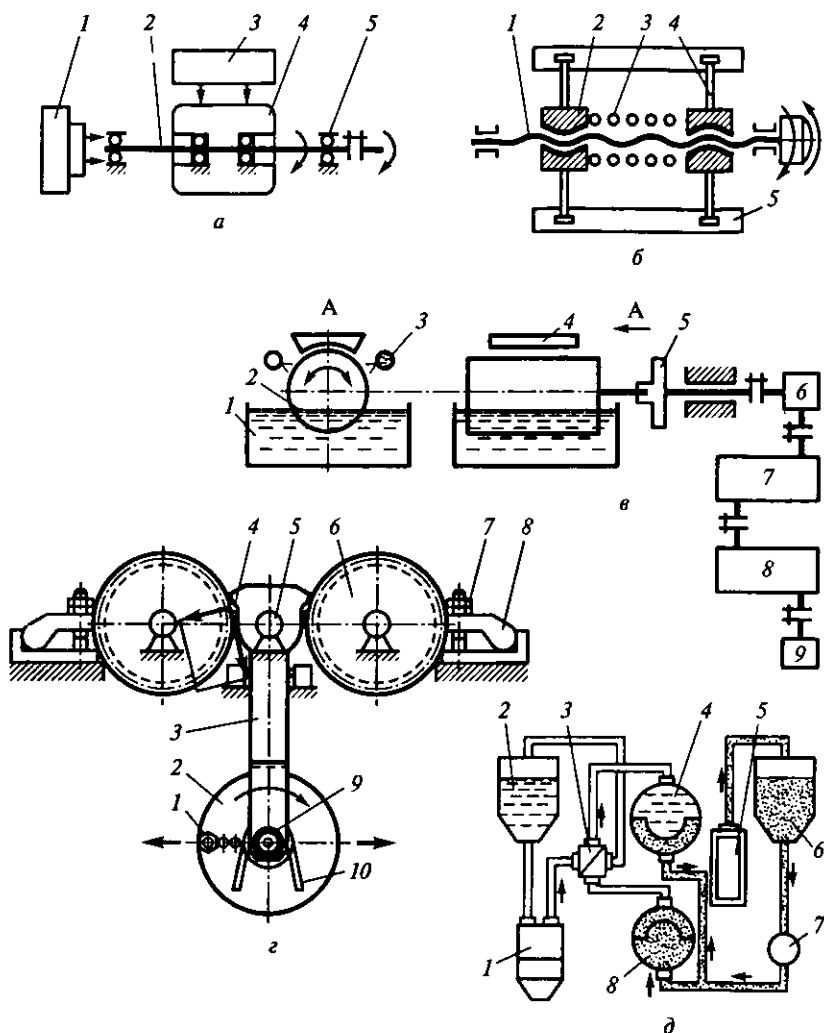


Рис. 3.32. Схемы стенов для испытаний изделий машиностроения на надежность:

a — подшипников качения (1 — радиально-упорный подшипник; 2 — вал; 3 — гидравлические цилиндры; 4, 5 — подшипники); *б* — пары винт—гайка (1 — винт; 2, 4 — гайки; 3 — пружина; 5 — основание); *в* — валки прокатных станов (1 — емкость с водой; 2 — испытуемый образец; 3 — устройство охлаждения; 4 — индуктор; 5 — захват; 6, 8 — редукторы; 7 — регулятор скорости; 9 — электродвигатель); *г* — крупномодульных зубчатых колес на усталость при изгибе (1 — груз; 2 — диск; 3 — рычаг; 4 — накладка; 5 — державка; 6 — зубчатые колеса; 7 — болты; 8 — прижимная планка; 9 — ось; 10 — клиноременная передача); *д* — насосов и плунжерных пар (1 — гидронасос; 2, 6 — баки; 3 — распределительный клапан; 4, 8 — гидравлические разделители; 5 — испытуемый элемент; 7 — насос подкачки)

в образце возникает переменное температурное поле, а следовательно, и температурные напряжения, которые вызывают термическую усталость.

На рис. 3.32, г приведена кинематическая схема стенда для испытаний на усталость при изгибе крупномодульных зубчатых колес, применяемых, например, в приводах кривошипных прессов. Одновременно испытывается восемь зубчатых колес. Нагружение зубьев производится Т-образным рычагом 3 со сменными шлифованными накладками 4, которые крепятся в державке 5. Державка сидит на оси, что обеспечивает практически одинаковое распределение сил на зубья колес. Зубчатые колеса 6 расклинены прижимными планками 8 с помощью болтов 7. В вилке нижнего конца рычага 3 на оси 9 на двух радиальных шарикоподшипниках насажен диск 2, ступицы которого служат ведомым шкивом клиноременной передачи 10. На диске 2 укреплен груз 1, являющийся неуравновешенной массой, которая создает переменную силу на испытываемые зубья.

Для оценки надежности насосов и плунжерных пар служит стенд, упрощенная схема которого приведена на рис. 3.32, д. Стенд применяют для исследования работоспособности гидроагрегатов и пропускания через них загрязненной жидкости. Гидронасос 1 подает из бака 2 чистое масло к распределительному клапану 3 и оттуда — в полость гидравлического разделителя 4. Разделитель представляет собой шаровой гидроаккумулятор с резиновой разделительной диафрагмой. В одной полости находится чистое масло, в другой загрязненное. Давлением в разделе-теле загрязненное масло вытесняется и направляется в испытуемый элемент 5, откуда затем жидкость попадает в бак 6. Из бака насосом подкачки 7 заполняется второй разделитель 8, который приводится в состояние готовности к подаче загрязненного масла в испытуемый элемент 5. После того как из первого разделителя 4 вытеснена загрязненная жидкость, кран 3 переключается и питание начинает поступать к гидроагрегату от разделителя 8, а разделитель 4 заполняется загрязненной жидкостью. Система обратных клапанов обеспечивает необходимое направление потоков масла.

Планирование испытаний

Главным вопросом планирования испытаний является установление требуемого количества испытываемых элементов — образцов, деталей, узлов и т.п. Соответствующая обработка данных об отказах должна обеспечить достоверность (с заданной вероятностью) количественной оценки надежности элементов. Такую оценку проводят на основе центральной предельной теоремы теории вероятностей. Допустим, имеется очень большое, назовем условно «бесконечное», количество результатов испыта-

ний. Например, бесконечное множество пределов выносливости $x_i = \sigma_{-i}$ образцов, вырезанных из куска металла. Наиболее часто распределение x , подчиняется нормальному закону, определяемому выражением

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (3.11)$$

где $f(x)$ — функция распределения переменной величины, называемая плотностью вероятностей; σ — среднеквадратичное (стандартное) отклонение «бесконечной» совокупности; μ — среднее значение «бесконечной» совокупности (рис. 3.33).

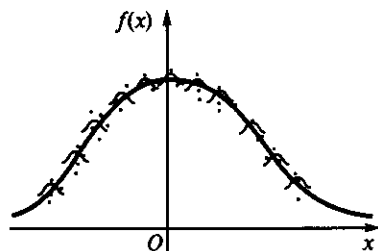


Рис. 3.33. График функции плотности вероятностей

Если из бесконечной совокупности взять несколько выборок по n в каждой (например, по 20–25), то статистические величины этих выборок будут также случайными.

Пусть $\bar{x}$ — среднее значение случайной совокупности размером n (выборочное, среднее), взятое из «бесконечной» совокупности со средним значением μ и стандартным отклонением

$\sigma/\sqrt{n}$. Доказано, что распределение $\bar{x}$ имеет среднее значение μ и стандартное отклонение $\sigma/\sqrt{n}$. В этом суть центральной предельной теоремы.

Доказано также, что если бесконечная совокупность, из которой сделаны выборки, распределяется нормально, то и распределение выборочных средних $\bar{x}$ также нормальное.

По аналогии с выражением (3.11) можно записать:

$$f(\bar{x}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{x}-\mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \right)^2 \right]. \quad (3.12)$$

Если в зависимости (3.12) обозначить

$$y = \frac{\bar{x}-\mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}, \quad (3.13)$$

то выражение (3.12) можно представить в следующем виде:

$$f(y) = \frac{1}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} y^2 \right]. \quad (3.14)$$

График зависимости этой функции приведен на рис. 3.34. Он симметричен относительно оси ординат, а $\mu = 0$. В этом случае говорят, что произвели нормирование зависимости (3.12) по уравнению (3.13). Использование выражения (3.14) позволяет существенно упростить расчеты.

Площадь $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)$ под куполообразной кривой характеризует вероятность появления событий. Площадь стремится к 100%, но никогда этой величины не достигает.

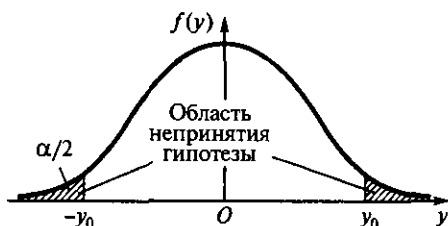


Рис. 3.34. График функции нормального распределения

В зависимости от степени ответственности испытаний можно заранее задать площадь под кривой или, другими словами, доверительную вероятность. Тогда оставшаяся площадь α (см. рис. 3.34) будет областью непринятия решений, т. е. не рассматриваемой площадью. Для этой площади при $\sigma = 1$ справедливо выражение

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \leq \alpha \right\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\alpha} e^{-\frac{y^2}{2}} dy, \quad (3.15)$$

где $y = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}.$

Выражение под знаком предела следует читать как вероятность того, что $(\bar{x} - \mu) / \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ меньше или равно α .

Если задаться доверительной вероятностью, то имеет место выражение

$$P \left\{ -y_0 \leq \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \leq y_0 \right\} = 1 - \alpha. \quad (3.16)$$

Рассматривая отдельно неравенство в скобках, нетрудно получить:

$$-y_0 \leq \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}, \text{ откуда } \mu \leq \bar{x} + y_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}};$$

$$y_0 \leq \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}, \text{ откуда } \mu \leq \bar{x} - y_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

или

$$\bar{x} - y_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + y_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.17)$$

Допустим, что из некоторой более большой (бесконечной) совокупности пределов выносливости образцов из стали 20 взята выборка из 25 образцов. Среднее значение пределов выносливости этой выборки $\bar{x} = \sigma_{\text{ср}} = 20$ кг/мм², среднеквадратичное (стандартное) отклонение $\sigma = 2$ кг/мм². Требуется определить среднее значение предела выносливости всей (бесконечной, $\alpha = 0,05$) совокупности при уровне доверия 95 % или 0,95.

По таблице интегральных функций распределения $f(x)$ для стандартного нормального распределения, имеющегося практически во всех справочниках по высшей математике, определяем ($1 - \alpha/2 = 0,975$), $y_0 = 1,96$.

В соответствии с (3.17) имеем

$$(20 - 1,96 \frac{2}{\sqrt{25}}) \leq \mu \leq (20 + 1,96 \frac{2}{\sqrt{25}})$$

или

$$19,2 < \mu < 20,7.$$

Это означает, что с уровнем доверия 95 % можно предсказать нахождение среднего значения $\sigma_{\text{ср}}$ бесконечной совокупности между 19 и 21 кг/мм².

Если принять уровень доверия 70 % (т. е. $\alpha = 0,3$), то для $1 - \alpha/2 = 0,95$, $y_0 = 1,04$. Следовательно, неравенство (3.17) примет вид

$$(20 - 1,04 \frac{2}{\sqrt{25}}) \leq \mu \leq (20 + 1,04 \frac{2}{\sqrt{25}}),$$

т. е. $\mu \approx 20$.

С уменьшением степени доверия разброс диапазона, в котором находится предполагаемое среднее значение, снижается.

Нетрудно сообразить, что длина доверительного интервала определяется разностью

$$(\bar{x} + y_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) - (\bar{x} - y_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) = \frac{2y_0\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.18)$$

Выражение (3.18) позволяет оценить необходимый объем выборки для заданного доверительного интервала. Рассмотрим, например, какое количество коробок передач следует испытать до разрушения, т. е. определить необходимый объем выборки. При этом зададим вероятность того, что выборочное среднее $\bar{x}$ отличается от среднего совокупности μ не более чем на 1,2 единицы и составляет 0,95. Для нормального закона распределения это означает, что половина ширины доверительного интервала, т. е. половина от разницы в выражении (3.18), должна равняться 1,2, т. е.

$$y_0\sigma/\sqrt{n} = 1,2, \text{ откуда} \quad (3.19)$$

$$n = \left(\frac{y_0\sigma}{1,2} \right)^2.$$

Полагая, например, $\sigma = 10$, при $\alpha = 0,05$ и $y_0 = 1,96$, имеем

$$n = \left(\frac{1,96 \cdot 10}{1,2} \right)^2 \approx 267.$$

Таким образом, необходимый объем выборки равен 267 коробок передач.

Следует заметить, что для изделий ответственного назначения с вероятностью безотказной работы 0,999 и выше необходимо провести стендовые испытания весьма значительного количества образцов или других изделий. В случае единичного или мелкосерийного производства такие испытания не всегда экономически оправданы. Видимо, необходимо в качестве дополнительной информации использовать данные расчета и данные об отказах аналогичных элементов в других конструкциях машин.

3.5. Контроль и диагностика качества продукции

Основой надежной работы автоматизированных технологических систем является непрерывный или периодический контроль за ходом ТП, реализуемых в этих системах. При этом решаются задачи по контролю точности деталей, точности работы оборудования, выявлению причин отклонения от заданной точности деталей и оборудования, к определению

методов и средств контроля, а также вопросы защиты от аварийных ситуаций. Для реализации этих функций в современном производстве активно используют микропроцессоры, лазерные системы и другую технику.

Контроль — проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям. Под объектом технического контроля понимают подвергаемую контролю продукцию, процессы ее создания, применения, транспортирования, хранения, технического обслуживания и ремонта, а также соответствующую техническую документацию.

Следовательно, объектом, данные о состоянии и свойствах которого подлежат при контроле сопоставлению с установленными требованиями, может быть продукция или процесс.

Контроль в АП бывает межоперационный (промежуточный), операционный (непосредственно на станке), послеоперационный, окончательный. Автоматизированному контролю должны подвергаться все элементы технологической системы: деталь, режущий инструмент, приспособление, само оборудование. Предпочтительными являются методы прямого контроля, хотя методы косвенного контроля шире используют при контроле инструментов, диагностике состояния оборудования.

Контроль в процессе обработки является одним из наиболее эффективных методов технического контроля, так как позволяет повысить качество выпускаемой продукции при одновременном увеличении производительности труда. Однако на точность обработки с применением активного контроля оказывают влияние различного рода изменения, происходящие в системе активного контроля и технологической системе. Изоляция станка и управляющего контрольного устройства от температурных влияний, вибраций и других внешних воздействий и стабилизация параметров технологической системы дают положительный эффект, но ограничены техническими возможностями. Поэтому разрабатываются самонастраивающиеся системы управляющего контроля. Контроль самонастраивающийся управляющий — управляющий контроль, при котором автоматически изменяются параметры настройки средства контроля на основе информации, получаемой при изменяющихся условиях работы, обеспечивая заданную точность при произвольно меняющихся внешних и внутренних возмущениях.

Необходимо отметить, что степень влияния отдельных возмущений (возмущающих факторов) в различной мере сказывается не только на стабильности получения заданного уровня качества обрабатываемого изделия, но и на изменении контролируемого параметра в процессе обработки каждой детали. Поэтому основная трудность создания подобных систем заключается в выявлении доминирующих возмущающих факторов, воздействие на которые для управления точностью обработки наиболее эффективно. При этом главная задача — это нахождение алгорит-

ма формирования корректирующего сигнала по изменяющемуся измеряемому возмущению.

Наиболее часто в промышленности, особенно в серийном производстве, применяют самонастраивающиеся управляющие системы контроля с коррекцией по отклонению измеряемого (контролируемого) параметра качества от заданного значения.

Для реализации функций контроля необходимы различные измерительные устройства с датчиками, устройства сбора и обработки информации, поступающей от измерительных устройств, а также устройства реализации выработанных решений. В качестве последнего используют либо саму систему ЧПУ оборудования, либо программируемый контроллер, входящий в систему управления автоматизированного комплекса. Работа контрольных устройств в РТК является главным источником информации для программного управления, в частности в качестве сигналов обратной связи.

При выборе методов и средств контроля для конкретных автоматизированных систем необходимо предварительно определять экономический эффект от их применения с учетом реализуемых в системах функций, а также условий эксплуатации этих систем.

Для всех видов контроля в каждом отдельном случае должны быть выбраны наиболее надежные и допустимые по точности приборы и устройства. В силу этого требования контрольные устройства должны быть просты и иметь требуемую точность измерения.

Весьма важно увязать систему автоматизированного контроля (САК) с основными элементами технологической системы, что позволяет ставить вопрос о разработке *технологического процесса измерений*, сопровождающего процесс изготовления деталей (рис. 3.35).

Непосредственно на участке механической обработки осуществляют контроль трех видов: установки заготовки в приспособление; изделия непосредственно на станке; выходной контроль.

Контроль установки детали в приспособление можно осуществлять на конвейере перед станком или на станке непосредственно перед обработкой. В первом случае можно использовать дат-

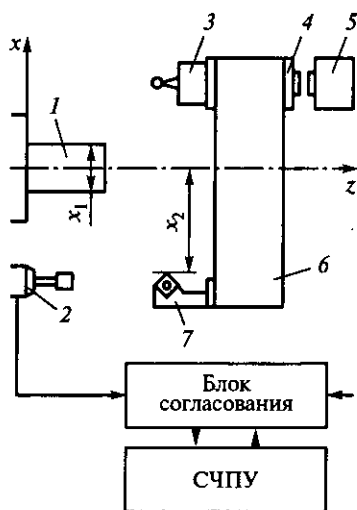


Рис. 3.35. Схема активного контроля:

1 — деталь; 2, 3 — щуповые головки; 4 — передающее устройство; 5 — приемное устройство; 6 — револьверная головка; 7 — инструмент

чики положения, расположенные на конвейере, или специальные измерительные установки с роботами. Бесконтактные датчики положения регистрируют отклонение действительного положения измеряемой поверхности от запрограммированного или разность условной базы и измеряемой поверхности (датчики касания).

К бесконтактным датчикам относят оптические измерители с погрешностью измерений $\pm 0,005$ мм; лазерные датчики с погрешностью измерений $\pm 0,001$ мм; датчики изображения (технического зрения) с погрешностью измерений $\pm 0,003$ мм. Датчики и принимающие камеры располагают на стойках у конвейеров или над конвейерами. Сигналы датчиков поступают в сравнивающее устройство, затем в АСУ, после чего производится корректировка положения заготовки в приспособлении перед установкой его на стол станка. Датчики касания моделей 19000–19002, выпускаемые ЛИПО, с погрешностью измерений $\pm 0,002 \dots \pm 0,005$ мм также можно устанавливать на конвейере, однако в основном их применяют для контроля положения и состояния заготовки непосредственно перед обработкой на станке, т. е. в зоне обработки.

Измерительные устройства, устанавливаемые на стойках у конвейеров, позволяют контролировать не только положение заготовки в приспособлении до обработки на станке, но и параметры детали после обработки при перемещении ее в приспособлении на другую позицию. Такие установки разработаны и изготавливаются фирмой «ДЕА» (Италия). Точность их измерения составляет $\pm 0,005$ мм при скорости перемещения заготовки на конвейере до 33 м/мин.

Выходной контроль заготовок деталей в процессе их транспортирования не удлиняет производственного цикла, однако наиболее оперативным является контроль заготовок и деталей непосредственно на станке. При небольшом увеличении длительности обработки выходной контроль существенно повышает ее качество.

Для контроля в зоне обработки применяют датчики касания (измерительные головки), закрепляемые в шпинделе, суппорте, revolverной головке, как и режущий инструмент. К таким датчикам относят отечественные БВ-4281 с погрешностью измерений $\pm 0,002$ мм; МВ-1 фирмы «Ренишоу электрикал» с разрешающей способностью 1 мкм; электронные щупы TF-6, TF-30, TF-56 фирмы «ДЕА», приборы для активного контроля размеров при шлифовании фирмы «Марпос» с погрешностью измерения $\pm 0,0005$ мм.

На токарных и круглошлифовальных станках с ЧПУ применяют индикатор контакта БВ-4271. Индикатор предназначен для выдачи информации о контакте наконечника и его щуповой головки с поверхностью детали и инструмента, используемого для определения размеров деталей, положения или состояния инструмента. Индикатор состоит из

щуповой головки для детали, щуповой головки для инструмента, передатчика, приемного устройства и электронного блока. Щуповая головка работает по принципу электроконтактного датчика, обеспечивающего выход двух сигналов «да» и «нет».

Щуповую головку для контроля положения и состояния инструмента устанавливают на неподвижной части станка и стыкуют с электронным блоком согласования. От системы ЧПУ в электронный блок согласования поступает сигнал, определяющий выбор одной из двух головок. Щуповую головку для контроля размеров деталей, передающее устройство, связанное кабелем с датчиком, и приемное устройство устанавливают на револьверной головке станка. В соответствующем положении револьверной головки выполняется ощупывание измеряемой детали. Прием информации от выбранной головки осуществляется с приходом сигнала «размещение» от СЧПУ. Далее выполняется формирование выходных сигналов и передача их в СЧПУ.

Контроль с помощью измерительных головок на станке можно рассматривать и как выходной контроль детали после конкретной (в том числе и после финишной) операции. Однако в ряде случаев целесообразнее и легче организовать специализированную контрольно-измерительную ячейку (КИЯ), обеспечивающую выносной контроль детали, чем контроль в зоне обработки. К таким случаям можно отнести контроль сложных корпусных деталей, например картера двигателя внутреннего сгорания.

Состав КИЯ определяется видом контролируемых изделий и может формироваться как на основе унифицированных измерительных систем отдельных параметров, так и на базе универсальных контрольно-измерительных машин (КИМ). Для механообработки характерен второй подход.

Наибольшую известность получили КИМ фирм «Маузерверке» (Германия), «Оптон» (Германия), «ДЕА» (Италия). На КИМ производят выходной контроль корпусных деталей, сложных штампов, зубчатых колес, червяков, кулачковых валов; управление процессом измерения осуществляют с помощью вычислительного устройства, связанного с АСУ автоматизированного участка. Контроль детали состоит в активном ощупывании ее по записанной в памяти управляющего вычислительного устройства программе. Записанную программу можно корректировать. При измерении в автоматическом режиме отсутствует необходимость в выравнивании или перезакреплении детали, поскольку ее положение распознается вычислительным устройством.

КИМ устанавливают за обрабатывающими центрами в конце участка или линии для осуществления выходного контроля деталей и изделий. Но КИМ можно устанавливать также непосредственно за участком

выставки и закрепления детали на спутнике, что позволяет оценить фактические размеры и положение поступающей на обработку заготовки. Обработка информации, поступающей с КИМ на ЭВМ, дает возможность определить оптимальное число рабочих ходов и внести возможные коррекции в режимы резания.

Цели и задачи технической диагностики

Слово «диагностика» происходит от греческого «диагнозис» и означает распознавание, определение. В медицине — это определение состояния человека и выявление причин его нездоровья, а в технике — состояния объекта, выявление его неисправностей и причин. Технический объект, состояние которого исследуется, называется *объектом диагностики*. Завершением исследования является получение *диагноза*, т. е. заключения о состоянии объекта: исправен, неисправен, в объекте имеется какая-то неисправность. Неисправность в работе агрегата, узла или системы в целом является следствием возникновения дефектов в его элементах. *Дефектами* деталей и других элементов машин называют отклонение их от первоначально установленного качества, заданного технологическими условиями, т. е. от заданных размеров, формы, показателей физико-механических свойств, чистоты поверхности, качества смазки, окраски и т. п. Возникновение и развитие дефектов зависит от ряда факторов: несовершенства конструкции, технологии изготовления, условий эксплуатации технического объекта и т. д. Обычно развитие дефектов и появление вследствие этого неисправностей происходит медленно и долгое время почти не отражается на его работе. Процесс медленного ухудшения показателей считается нормальным и естественным. Но при некоторых условиях дефекты возникают и развиваются очень быстро. Их количественные показатели за короткое время достигают предельных значений, и объект резко ухудшает свои параметры, а иногда становится непригодным к использованию.

Основой технической диагностики является анализ различных физических процессов, происходящих в работающей машине, и их влияния на ее эксплуатационные показатели. Последние в момент времени t определяются уровнем и стабильностью характеристик рабочего процесса и качеством деталей и сопряжений, обладающих определенными физическими свойствами (линейными размерами, точностью, взаимным расположением, формой, шероховатостью, волнистостью поверхности и другими геометрическими параметрами, структурой и твердостью материала и т. д.).

В истории любого технического объекта можно выделить этапы производства и эксплуатации, когда объект применяют по назначению, под-

вергают профилактическим проверкам, ремонту, проверкам после ремонта и т.д. На каждом этапе существования объекта для него в соответствии со служебным значением задают определенные эксплуатационные показатели, которым он должен соответствовать. Однако вследствие неисправностей это соответствие может нарушаться. Эксплуатационные показатели охватывают *основные параметры* объекта, характеризующие выполнение заданных функций, и *второстепенные*, такие, как удобство эксплуатации, внешний вид и т.п.

Объект исправен, если он полностью соответствует всем эксплуатационным показателям, т. е. все его параметры, как основные, так и второстепенные, находятся в заданных пределах.

Объект работоспособен, если все его основные параметры находятся в пределах заданной нормы. Выход любого параметра из пределов нормы означает неисправность.

Объект функционирует, если его основные параметры, характеризующие работу в данном режиме и в данное время, не выходят за допустимые пределы.

В зависимости от полноты определения соответствия параметров объекта заданным эксплуатационным показателям различают несколько задач диагностики: проверка исправного состояния; проверка работоспособности, проверка функционирования.

Проверка исправности. Цель — убедиться, что в объекте нет ни одной неисправности и ни один из параметров не выходит за заданные пределы. Это наиболее полный вид контроля. На этапе производства он позволяет узнать, содержит ли объект дефектные компоненты, а их монтаж (сборка) — ошибки. На производстве задачи проверки исправности возлагаются на отдел технического контроля. При ремонте проверка исправности позволяет убедиться, все ли дефекты устранены.

Проверка работоспособности. Цель — оценка способности объекта выполнять все функции, предусмотренные его алгоритмом работы. Это менее полный контроль, который может не обнаружить неисправности, не препятствующие применению объекта по назначению. Например, резервированный объект может иметь неисправности в резервных компонентах. Проверка работоспособности осуществляется на этапе эксплуатации объекта при профилактике перед применением объекта по назначению.

Проверка функционирования. Цель — следить за тем, не появились ли неисправности, нарушающие работу в данное время. Это еще более упрощенный контроль работы объекта только в одном режиме, который проводится на этапе эксплуатации.

Таким образом, исправный объект всегда работоспособен и правильно функционирует. Неправильно функционирующий объект всегда не-

работоспособен и неисправен. Правильно функционирующий объект может быть неработоспособен и, следовательно, неисправен. Работоспособный объект правильно функционирует, но может быть неисправен. Например, электроплита, осуществляющая нагрев, правильно функционирует, но может не обеспечивать регулирование температуры, т. е. быть неработоспособной. Электроплита, в которой блок регулирования температуры работает, может не обеспечивать точность поддержания температуры или сопротивления изоляции электрических цепей относительно корпуса, т. е. иметь неисправности. Теория технической диагностики базируется на понятиях «система» и «элемент».

Система — совокупность элементов, взаимосвязанные функции которых координируются для выполнения общей задачи. Понятие системы охватывает объект в целом.

Элемент (блок, узел) — часть системы, которая выполняет заданные функции. Разделение системы на произвольное число частей, каждая из которых выполняет определенную функцию, неоднозначно. Понятие «элемент» нельзя жестко привязывать к определенной детали или узлу. Объект может выступать как один элемент при проверке функционирования или работоспособности или разделен на составные части при поиске неисправностей.

В процессе эксплуатации и ремонта некоторые свойства объекта могут изменяться, что приводит к изменению его состояния. *Состояние* — точно определенное поведение, характеризуемое совокупностью некоторых свойств машины или ее механизма, которое может быть опознано, если повторится снова. Это понятие в равной степени относится к деталям, узлам, другим элементам машины и к системе в целом. Можно выделить три типа задач по определению технического состояния объекта:

- *определение состояния*, в котором объект находится в настоящий момент времени, — задача *диагностики*;
- *предсказание состояния*, в котором объект окажется в некоторый будущий момент времени, — задача *прогностики* (от греч. прогностис — предсказание, предвидение);
- *определение состояния*, в котором объект находился в некоторый момент времени в прошлом, — задача *генетики*, или *генезиса* (от греч. генезис — происхождение, возникновение).

Задачи генезиса возникают при расследовании аварий, отказов и их причин, когда настоящее состояние объекта отличается от состояния, в котором он оказался в прошлом, в результате появления первопричин, вызвавших отказ. Эту задачу решают путем определения возможных или вероятных предысторий, приведших объект в настоящее состояние. К задачам технической прогностики относят задачи, связанные с определением срока службы объекта, необходимой периодичности проверок и ремон-

тов. Их решают путем определения возможных или вероятных эволюций состояний объекта, начинающихся в настоящий момент времени.

Таким образом, знание состояния объекта в настоящий момент времени является обязательным как для генезиса, так и для прогностики, т. е. в их основе лежит техническая диагностика. Знание методов и принципов последней дает возможность заменить интуитивные методы, оценки состояния объекта, которые требуют высокой квалификации и опыта, а также решить проблемы анализа состояния новых объектов постоянно возрастающей сложности, не доступные интуитивным методам.

При технической диагностике принято, что элемент может находиться только в одном из двух состояний: исправном или неисправном. Число

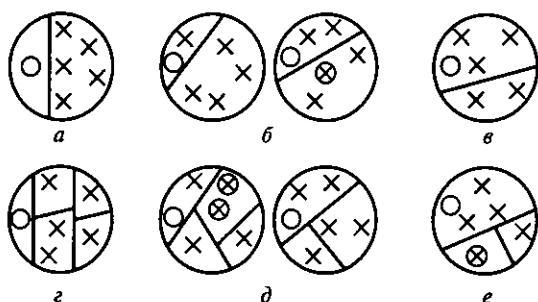


Рис. 3.36. Схемы состояний объекта диагностики:

о — исправное состояние; х — возможное неисправное состояние; ⊗ — неисправное состояние

возможных состояний системы равно числу комбинаций отказов ее элементов. Исправное единственное состояние и возможные неисправные состояния системы образуют множество E ее технических состояний. Условно ограничим множество E замкнутой кривой (рис. 3.36). Исправное состояние обозначим малым кружком, возможные неисправные состояния — крестиками, а отказавшие — крестиком в кружочке. Результатом проверки исправности является получение двух подмножеств технических состояний (рис. 3.36, а и г). Одно из них содержит только исправное состояние, а второе — все неисправные. При проверке работоспособности (рис. 3.36, б и д) и функционирования (рис. 3.36, в и е) может быть несколько вариантов разбиения множества E на подмножества. В первое подмножество входят исправное состояние и те неисправные состояния, находясь в которых объект сохраняет работоспособность или правильно функционирует. В результате поиска неисправностей второе подмножество разбивается на ряд областей различных между собой неисправных состояний (рис. 3.36, г, д и е). Число областей определяет достигаемую при поиске неисправностей детализацию мест и состава неисправностей. Эту

степень детализации называют *глубиной поиска*, или *глубиной диагностирования*. В технической диагностике состояние оценивают набором вещественных чисел (*параметров состояния*) $x_1, x_2, \dots, x_n$, характеризующих существенные физические свойства элементов объекта и их соединения друг с другом в рассматриваемый момент времени t . Состояние объекта и эксплуатационные показатели можно определить, если известно значение каждого диагностического параметра $x_1, x_2, \dots, x_n$. В этом случае необходимо оценить, прежде всего, значение функциональных параметров. *Функциональными* являются геометрические, электрические, механические и другие параметры, влияющие на эксплуатационные показатели машин или служебные функции их деталей и узлов. Например, от величины зазора между парой поршень и цилиндр компрессора (функционального параметра) зависит потребляемая мощность электродвигателя и массовая и объемная производительность (эксплуатационные показатели). В принципе уровень диагностических параметров x_i можно было бы точно определять по величинам функциональных параметров элементов разобранного технического объекта. Однако любая разборка и сборка объекта связана с нарушением взаимной приработанности сопрягаемых элементов, что ведет к сокращению их срока службы. Необходимо также учитывать трудоемкость сборки машин. Поэтому в технической диагностике диагноз объекта рассматривают как общий метод опознавания состояния механизма без его разборки в условиях эксплуатации и ремонта. Результаты диагноза являются основанием для принятия решения о дальнейшем использовании техники или о характере предстоящего ремонта. Состояние технического объекта, характеризваемое уровнем диагностических параметров x_i , оценивают по значениям диагностических сигналов. *Диагностическими сигналами* называют процессы, служащие переносчиками информации о состоянии элементов и их сочленений из объекта к оператору или диагностическому прибору. Анализ сигнала заключается в том, что из бесконечной совокупности его свойств фиксируются и оцениваются только те, которые несут наибольшую диагностическую информацию. Результатом анализа является описание сигнала через количественные значения его параметров, которое затем используется для принятия решения о конкретном состоянии объекта. Процесс диагноза состоит из восприятия сигнала элемента объекта, выделения в сигнале характерных признаков и сопоставления этих признаков с признаками сигналов, соответствующих возможным состояниям элемента, которые должны различаться при диагнозе.

Одним из главных вопросов диагностики является разрешимость диагностической задачи. В технической диагностике принято, что всякое изменение считающихся известными параметров, диагностического сигнала обусловлено изменением параметров состояния x_i механизма, кото-

за должен быть строго регламентирован и состоять из последовательности точных и четких предписаний, а диагностический вывод должен определяться только состоянием объекта.

В технической диагностике рассматривают: множество возможных состояний объекта; множество сигналов; отображения множества состояний на множество сигналов и обратное отображение; источники помех; критерии эффективности диагноза.

Виды технической диагностики

Диагностику технического состояния объекта выполняют с помощью специальных технических средств. Процесс диагностики представляет собой многократную подачу на объект определенных воздействий (входных сигналов) и многократное измерение и анализ ответов объекта на эти воздействия (выходных сигналов). Этот процесс можно разбить на отдельные части, каждая из которых представляет собой физический эксперимент над объектом. Воздействия на объект диагностики и его реакции на эти воздействия и называют *элементарной проверкой*. Ответы можно снимать с основных выходов объекта и с дополнительных выходов, организованных специально для диагностики. Эти выходы называют *контрольными точками*.

Результат проверки — полученные при ее реализации значения ответов, т. е. сигналов в контрольных точках. Эти сигналы могут иметь различный физический характер: параметры электрических сигналов, давление, скорость, температура, мощность и др.

Очевидно, что объект, находящийся в различных технических состояниях, может выдавать разные результаты одной и той же элементарной проверки. При фиксированном составе выходов (контрольных точек) объекта элементарные проверки могут различаться между собой только воздействием. И наоборот, элементарные проверки различаются между собой только составом выходов, если зафиксировано воздействие. Проверки могут охватывать различное число элементов объекта. Различают поэлементные, групповые и глобальные проверки. *Поэлементная проверка* состоит в контроле каждого элемента системы в отдельности. *Глобальная проверка* должна охватывать все элементы.

Воздействия на объект могут подаваться от средств диагностики или являться внешними по отношению к ним, т. е. вырабатываться в самом объекте в процессе его функционирования. Измерения и анализ ответов объекта всегда осуществляются средствами диагностики.

Диагностика, в процессе которой воздействия на объект вырабатываются диагностическими средствами, называется *тестовой* (рис. 3.37). При тестовой диагностике состав и последовательность подачи воздей-

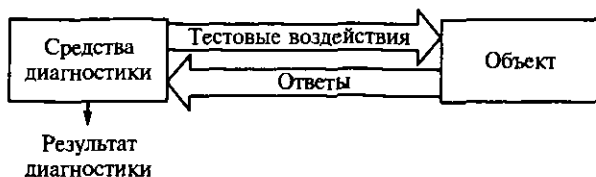


Рис. 3.37. Схема тестовой диагностики

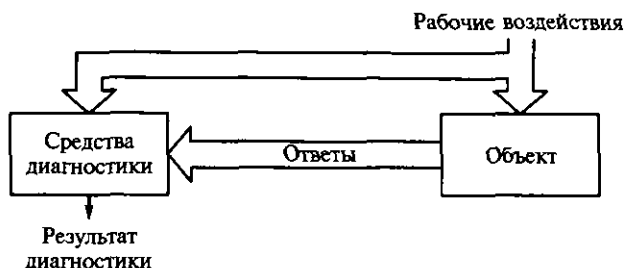


Рис. 3.38. Схема функциональной диагностики

ствий можно выбирать исходя из условий эффективной организации диагностического процесса. Можно осуществлять выбор очередного воздействия в зависимости от результатов анализа ответов на предыдущее воздействие. Системы тестовой диагностики используют для любых видов контроля: исправности, работоспособности, функционирования, поиска неисправностей. Обычно тестовую диагностику применяют, когда объект не используется по своему прямому назначению. Однако возможно использование этого метода и при работе объекта, если тестовые воздействия не влияют на его нормальный режим функционирования. Например, если исполнительный механизм инерционен, то возможна подача кратковременных тестовых импульсных воздействий на схему управления этим механизмом.

В случае, когда подачу воздействий на объект от средств диагностики не производят, а используют только рабочие воздействия объекта, предусмотренные его алгоритмом функционирования (рис. 3.38), диагностику называют *функциональной*. Системы функциональной диагностики применяют, как правило, для контроля функционирования и поиска неисправностей, нарушающих нормальное функционирование (например, диагностика холодильника по вибрациям корпуса и хладоагрегата или по шумам). Системы функциональной диагностики часто используют в режимах имитации функционирования объекта. При этом, естественно, имитируют рабочие воздействия. Это наиболее распространенный случай при наладке и ремонте. Например, при настройке телевизоров используют генератор телевизионного сигнала, имитирующий рабочий

сигнал. Вращением регулятора температуры нагревательного прибора можно имитировать тепловое воздействие.

Результатом технической диагностики являются суждения. Для формирования диагноза типа «объект исправен», «объект неисправен», «в объекте неисправен такой-то элемент» необходима обработка ответов объекта на воздействия, т. е. сигналов в контрольных точках. В простейшем случае такая обработка может заключаться в сравнении значений сигналов с допустимыми, эталонными значениями. Возможна и более сложная обработка. В простых случаях диагностики функции обработки могут быть возложены на оператора, в более сложных случаях применяют автоматизированные измерительно-вычислительные средства. Для определения допустимых значений сигналов необходимо располагать информацией о поведении исправного (работоспособного, правильно функционирующего) объекта, а также о его поведении в неисправном состоянии. Объектами исследований в технической диагностике являются реальные технические системы. Их теоретический анализ предполагает определенную идеализацию объекта, при которой выделяют существенные свойства реальных систем и не учитывают второстепенные, т. е. реальные системы заменяют моделями. Таким образом, задачи технической диагностики заключаются в изучении объектов диагностики, построении и анализе их моделей, сборе и обработке статического материала о поведении объекта и его диагностике, разработке средств и методик технической диагностики.

Функциональные модели объектов диагностики

Одной из наиболее широко распространенных форм описания технических объектов является функциональная схема. Функциональные схемы выполняют исходя из удобства описания и анализа работы объекта. На них показывают существенные связи между его элементами. Для целей диагностики объект представляют функциональной моделью, которая отличается от обычной функциональной схемы. Прежде всего изменяют разделение объекта на функциональные элементы. При построении такой модели исходят из необходимой точности локализации неисправностей. Последняя, в свою очередь, зависит от выбранного способа ремонта и определяется с учетом конструктивных и экономических соображений. Выбранный таким образом функциональный элемент можно непосредственно использовать в качестве *первичного функционального элемента* модели, если он позволяет составить модель, удовлетворяющую следующим положениям:

1. Каждый функциональный элемент имеет один выходной сигнал при произвольном числе входных. В противном случае элемент должен

быть разделен на части, каждая из которых определяет значение своего выходного сигнала.

2. Связи между функциональными элементами должны соответствовать связям функциональной схемы объекта.

3. Для каждого функционального элемента известны допустимые значения входных и выходных сигналов, его функциональные связи и методы контроля.

4. Неисправный элемент при номинальных (допустимых) входных сигналах выдает выходной сигнал, выходящий за пределы допустимого значения.

5. Выход за пределы допустимого значения хотя бы одного из входных сигналов приводит к появлению недопустимого выходного сигнала.

6. Внешние по отношению к объекту диагностики входные сигналы всегда принимают допустимые значения.

7. Если выходной сигнал одного элемента служит входным сигналом второго, то диапазоны их допустимых значений совпадают.

8. Цепи связи между функциональными элементами модели абсолютно надежны. Если допускаются неисправности физических связей между элементами объекта, то такие связи должны быть учтены в виде элементов модели.

При выполнении перечисленных условий функциональную модель можно использовать для выработки оптимальной процедуры диагностики и поиска неисправностей. Для правильного составления функциональной модели необходимо четко представлять себе функционирование объекта и взаимодействие между собой его элементов. Анализ функциональных и принципиальных схем объекта облегчает этот процесс.

В качестве примера рассмотрим составление модели для компрессионного бытового холодильника. В электросхему холодильника входят следующие элементы: шнур питания; лампочка освещения, включающаяся при открывании дверцы с помощью выключателя; терморегулятор, отключающий хладоагрегат при достижении требуемой температуры в холодильной камере и включающий его через пускозащитное реле при повышении температуры; электродвигатель компрессора (рис. 3.39).

Пускозащитное реле выполняет в соответствии со своим служебным названием две функции. Во-первых, в момент пуска хладоагрегата через рабочую обмотку 2–3 двигателя протекает большой ток, который вызывает срабатывание электромагнитного пускателя (МП) и замыкание его нормально разомкнутых контактов (К). Через них кратковременно подключается к напряжению питания пусковая обмотка 1–2 двигателя. После пуска двигателя ток рабочей обмотки уменьшается и электромагнитный пускатель размыкает свои контакты, отключая пусковую обмотку.

Во-вторых, реле обеспечивает защиту электродвигателя. В случае

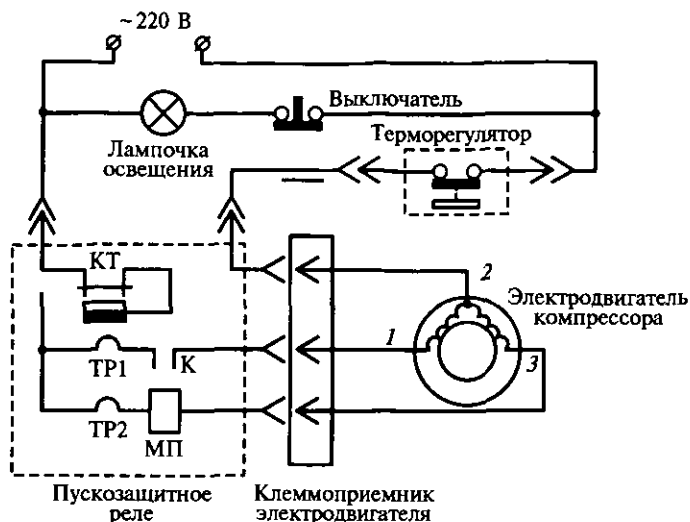


Рис. 3.39. Электросхема объекта диагностирования (холодильника): ТР1, ТР2 — тепловое реле; КТ — биметаллический контакт; К — контакт; МП — магнитный пускатель; 1-2 — пусковая обмотка двигателя; 2-3 — рабочая обмотка двигателя

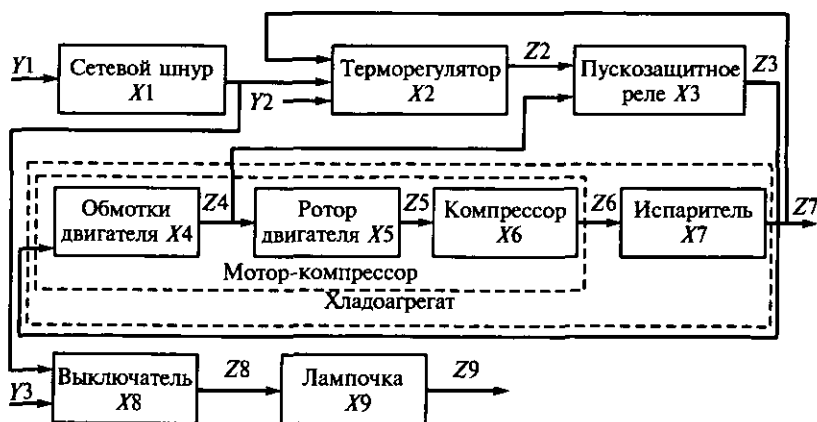


Рис. 3.40. Диагностическая функциональная модель холодильника

короткого замыкания обмоток или заклинивания электродвигателя через тепловое реле ТР1 и ТР2 протекает достаточно долго недопустимо большой ток. Под действием тепла размыкается биметаллический контакт КТ, обесточивая электродвигатель.

Построим функциональную модель, позволяющую провести поиск неисправностей по схеме, представленной на рис. 3.40. Элементы модели обозначим буквами X с порядковым номером, внешние воздействия — буквами Y , а выходные сигналы — буквами Z (см. рис. 3.40). В диагностическую функциональную модель включен хладагрегат, содержащий мотор-компрессор и испаритель с трубопроводом. Учтена тепловая связь между испарителем $X7$ и терморегулятором $X2$. Влияние тока обмоток $X4$ электродвигателя на работу пускозащитного реле $X3$ учтено за счет обратной связи. При этом, так как каждый элемент модели может иметь только один выходной сигнал, электродвигатель представлен состоящим из обмотки $X4$ с электрическим током в качестве выходного сигнала $Z4$ и ротора, механически связанного с компрессором. Внешние выходные сигналы: $Y1$ — напряжение питания 220 В; $Y2$ — положение ручки терморегулятора; $Y3$ — положение кнопки выключателя. Выходными сигналами $Z1, Z2, Z3, Z8$ являются напряжения 220 В, а сигналом $Z4$ — ток обмоток двигателя. Так как связь ротора $X5$ и компрессора $X6$ недоступна для наблюдения, то в качестве $Z5$ можно использовать шум от работы мотора-компрессора; $Z6$ — давление хладагента на выходе компрессора; $Z7$ — температура; $Z9$ — свечение лампочки.

Состав и степень детализации функциональной модели можно изменять в зависимости от конкретно решаемой диагностической задачи. Например, при проверке функционирования холодильника можно проверить работу лампочки (выходной сигнал $Z9$) при открывании и закрывании дверцы (внешний сигнал $Y3$) и включение-выключение хладагрегата (выходной сигнал $Z5$) при вращении ручки терморегулятора (внешний сигнал $Y2$). При проверке работоспособности дополнительно должна быть измерена температура в холодильной камере (выходной сигнал $Z7$). При поиске неисправностей в электрической схеме холодильника можно применить тестовый метод. Для этого в качестве сигнала $Y1$ необходимо подать небольшое напряжение, например от омметра, и проверить сигналы $Z1, Z2, Z3, Z4, Z8$.

Функциональная модель, приведенная на рис. 3.40, более удобная при выборе выходных сигналов для решения различных задач диагностики и разработке алгоритмов поиска неисправностей по сравнению со схемой, приведенной на рис. 3.39.

Графы причинно-следственных связей объектов диагностики

В случаях, когда объект не имеет явно выраженных функциональных блоков, построение функциональной модели может быть затруднено. Эта ситуация особенно характерна для механических и гидравлических объек-

тов. Часто встречаются ситуации, когда точные зависимости между параметрами объекта неизвестны, а известно лишь то, что один параметр в какой-то степени влияет на другой или каким-то образом от него зависит. Такое влияние можно описать причинно-следственными связями, которые удобно изображать в виде графа. Вершины графа представляют собой параметры, события или явления, а линии (дуги, ветви) отражают связи. Направление дуг — от причин к следствиям. В принципе такой граф близок к функциональной модели, но его вершины являются не функциональными элементами, а параметрами или событиями. При построении графа удобно представлять не все входные, выходные и внутренние параметры объекта, а только те, которые доступны для наблюдения и анализа. Рассмотрим в качестве примера построение графа причинно-следственных связей для системы смазки подшипников редуктора (рис. 3.41).

Выходными параметрами системы являются температуры T_1 , T_2 и T_3 вкладышей подшипников соответственно входного, промежуточного и выходного валов. Смазывание производится маслом, циркуляцию которого обеспечивает шестеренчатый масляный насос. При снижении давления масла в напорной магистрали ниже допустимого значения срабатывает сигнализатор давления H_m . Электронагреватель осуществляет обогрев маслоборника. При необходимости последний охлаждается проточной

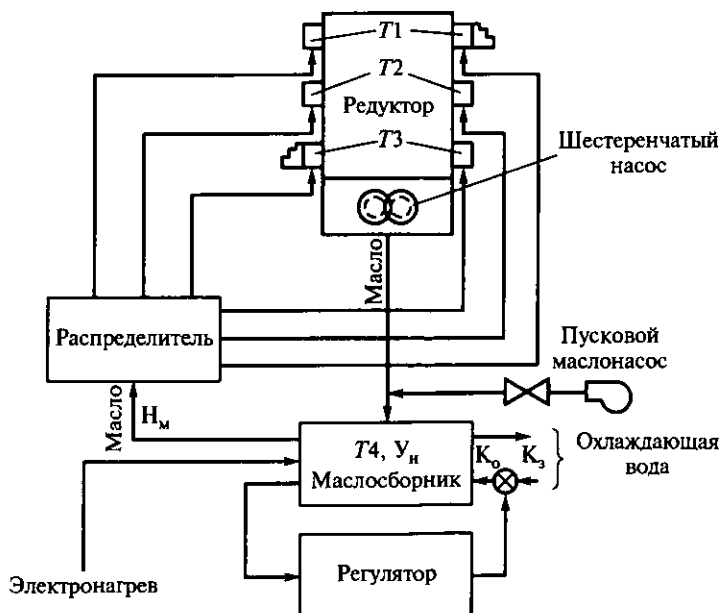


Рис. 3.41. Система смазки подшипников редуктора

водой. Подачей проточной воды в рубашку маслосборника управляет регулятор, стабилизирующий температуру T_4 в маслосборнике. Исполнительным органом регулятора служит клапан с концевыми выключателями K_0 и K_3 . Выключатель K_0 указывает на достижение верхнего уровня регулирования (клапан полностью открыт), а K_3 — нижнего уровня регулирования (клапан закрыт). В маслосборнике смонтирован сигнализатор нижнего уровня масла Y_n . Для повышения уровня масла осуществляется включение на определенное время пускового маслоснасоса.

Для составления графа (рис. 3.42) выберем следующие события, которые характеризуют неисправности: температура T_1 выше допустимой, т. е. нормы (H), $T_1 > H$; температура T_2 выше допустимой, $T_2 > H$; температура T_3 выше допустимой, $T_3 > H$; температура T_4 выше допустимой, $T_4 > H_1$; температура T_4 ниже допустимой, $T_4 < H_2$; давление масла ниже нормы, $D < D_n$; уровень масла ниже нормы, $Y < Y_n$; клапан охлаждающей воды не закрыт, $\bar{K}_0$; клапан охлаждающей воды не открыт полностью, $\bar{K}_3$.

Указанные события определяют вершины графа. Причинно-следственные связи между выбранными событиями можно установить интуитивно на основе здравого смысла. Превышение допустимого значения температур T_1 , T_2 , T_3 может быть вызвано или превышением температу-



Рис. 3.42. Граф причинно-следственных связей системы смазки подшипников редуктора

ры масла допустимого значения $T_4 > H_1$, или снижением его давления ниже нормы $D < D_*$. В свою очередь, событие $T_4 > H_1$ может быть вызвано неисправностью регулятора, когда не открыт полностью клапан K_0 . Причинами снижения давления масла $D < D_*$ могут быть понижение уровня масла $Y < Y_*$ или достижение температурой T_4 нижнего значения $T_4 = H_2$. Последнее событие может быть вызвано неисправной работой регулятора, когда клапан не закрывается $\bar{K}_3$. На графе, представленном на рис. 3.42, вершины представлены кругами, в которые вписаны условные обозначения событий. По аналогии с функциональной моделью обозначим события через X с соответствующими номерами. На этот граф можно наложить конкретные неисправности, связав их с выбранными событиями: недостаточное давление охлаждающей воды; неисправная работа регулятора; недостаток масла в системе; неисправность шестеренчатого насоса; неисправность электроподогрева; засорение подшипников.

Данный перечень в значительной мере произвольный. Его составляют с учетом вероятностей возникновения и важности обнаружения конкретных неисправностей. Для наложения неисправностей на граф причинно-следственных связей каждую неисправность рассматривают как причину появления соответствующего события. Например, недостаточное давление воды может привести к событию $T_4 > H_1$, неисправность регулятора — к событиям $\bar{K}_0$ или $\bar{K}_3$ и т. д.

Модели состояний объектов диагностики

Для разработки оптимальных диагностических процедур недостаточно описания поведения объекта в исправном и неисправном состояниях посредством функциональной модели. Необходимо учитывать отношение между множеством состояний системы и множеством возможных для нее проверок. Такое отношение наиболее удобно описать в табличной форме, называемой *таблицей состояний (неисправностей)*. Таблица состояний удобна для ввода в ЭВМ и машинного поиска оптимальных диагностических процедур. Она является следующим шагом в формализации описания поведения объекта диагностики. Таблицу состояний строят на основе какой-либо модели объекта: функциональной модели, функциональной или принципиальной схемы и т.п.

Состояния системы кодируют двоичными числами, каждый разряд которых отображает состояние соответствующего элемента системы. Нули ставятся в разряды, соответствующие исправным элементам, а единицы — в разряды, соответствующие неисправным элементам. Можно также обозначать состояние системы совокупностью номеров неисправных элементов. Например, для системы, представленной на рис. 3.42, состояние, при котором неисправны элементы X_1 , X_4 и X_6 , можно обозна-

чить как S_{146} или закодировать двоичным числом 100 101 000. Состояние исправной системы обозначается S0 и ему соответствует двоичный код 000 000 000. При контроле функционирования или работоспособности объект диагностики рассматривают как один элемент, и возможно только два состояния объекта. Для объекта, содержащего n элементов, возможно 2^n состояний.

Проверку системы, состоящей из n элементов, можно обозначать аналогичным n -разрядным кодом. Нули ставят в разрядах, соответствующих номерам элементов, состояние которых влияет на результат проверки, т. е. охваченных ей. В остальных разрядах ставят единицы. Номер проверки определяется номером элемента, выходной сигнал которого контролируется. Можно также обозначать проверку совокупностью номеров элементов, состояние которых влияет на результат проверки. Например, для системы, изображенной на рис. 3.42, проверка П9 сигнала на выходе элемента Х9 (загорание лампочки) будет иметь десятичный код 189 или двоичный код 011 111 100, что означает, что на результат влияет состояние элементов Х1, Х8 и Х9. Элементы Х2–Х7 проверкой П9 не охвачены и их состояние на результат проверки не влияет.

При положительном результате проверки все охваченные ею элементы исправны. При отрицательном результате, когда проверяемый сигнал выходит за пределы допускаемого значения, хотя бы один из охваченных проверкой элементов неисправен. При построении таблицы состояний на основе причинно-следственных связей слово состояний содержит единицы в разрядах, соответствующих наступившим событиям. Например, для графа, представленного на рис. 3.44, состояние 659 (двоичный код 000 010 001) соответствует появлению событий Х5 и Х9, т. е. температура масла в маслосборнике и температура вкладыша третьего подшипника выше нормы, и, следовательно, недостаточно давление охлаждающей воды и засорен третий подшипник. Код проверки содержит нули в разрядах, соответствующих событиям, влияющим на результат проверки. Например, для графа, приведенного на рис. 3.44, проверка П6 сигнала Z6 (давление масла) будет иметь код 1346 (двоичный код 010 010 111). На результат этой проверки влияют события Х1, Х3, Х4 и Х6, т. е. положение выключателя К₃ (исправность регулятора), уровень масла в маслосборнике, температура масла в маслосборнике (исправность электроподогрева) и давление масла (исправность шестеренчатого насоса).

Классификация методов диагностирования технологического оборудования

Традиционный метод технического обслуживания (ТОБ) и ремонта оборудования (по мере появления неисправностей) не дает возможности

поддерживать его работоспособность на достаточно высоком уровне в период эксплуатации. Использование диагностических методов контроля обеспечивает более полное соответствие между состоянием объекта и объемом работ, необходимых для его ТОБ и ремонта. Основным принципом ТОБ и ремонта, основанным на диагностировании, является предупреждение отказов в работе оборудования при обеспечении максимально возможного времени работы до их появления.

Методы технической диагностики классифицируют

по стадиям эксплуатации: на этапах наладки, ТОБ, выполнения плановых ремонтов оборудования;

по степени использования технических средств — выполняемые: без технических средств; с применением простейших средств усиления информационного сигнала (субъективные); с использованием технических средств (объективные);

по глубине диагностирования ТС — общие и поэлементные;

по степени информативности — методы, обеспечивающие получение информации о моменте появления отказа; месте возникновения дефекта; причине отказа при использовании автоматических средств диагностики;

по видам диагностической информации — методы диагностирования, выявляющие сведения о самом контролируемом процессе, косвенных показателях, сопутствующих прохождению процесса.

Диагностическую информацию получают путем измерения ряда параметров: величин вибраций; акустических колебаний; собственных деформаций детали ТС; деформаций в стыках пар сопрягаемых неподвижных и подвижных деталей; усилий, действующих в ТС; параметров, сопутствующих процессу обработки (режимы, температура отдельных элементов ТС, длительность циклов обработки, производительность).

По архитектонике построения процесса диагностирования оборудования различают: поэлементные проверки, групповые проверки, логический анализ симптомов отказа. Диагностирование ТС является сложным процессом. На рис. 3.43 представлены основные параметры диагностирования металлообрабатывающего оборудования с привязкой к отдельным его сборочным единицам и элементам.

Различают пассивные и активные средства технической диагностики. Пассивные служат только для определения и оценки показателей, характеризующих текущее состояние оборудования. Активные воздействуют на объект диагностирования, вырабатывают и посылают сигнал, который вызывает оцениваемую реакцию оборудования.

По принципу диагностирования все технические средства подразделяют на средства: для проверки работы оборудования, для оценки точности параметров изготавливаемых деталей или норм точности оборудо-

вания. Эти средства бывают ручными, полуавтоматическими и автоматическими. По характеру решаемых задач технические средства подразделяют на средства проверки оборудования, посредством которых определяют его соответствие заданным техническим условиям, и средства проверки работоспособности, с помощью которых оценивают возможность оборудования выполнять заданный алгоритм функционирования в рабочем цикле.

Возникающие в процессе эксплуатации оборудования отказы классифицируют: по внешнему проявлению (явные и скрытые), по функционированию и параметру, по взаимосвязи (зависимые и независимые). Внешние проявления скрытых отказов зависят от нескольких причин. Явные отказы элементов оборудования определяются визуально. При отказе функционирования работа оборудования становится невозможной. При отказе по параметру размеры изготавливаемых деталей выходят за пределы уста-



Рис. 3.43. Параметры диагностирования основных элементов металлообрабатывающего оборудования

новленного допуска либо время цикла изготовления превышает расчетное значение, однако при этом оборудование остается работоспособным. Появление независимых отказов может быть вызвано любыми причинами, кроме воздействия другого отказа. Зависимые (вторичные) отказы обусловлены действием первичного отказа.

Одним из простых и информативных методов диагностирования оборудования является метод термометрии, основанный на измерении температуры элементов оборудования. Использование этого метода дает возможность определять и контролировать деформации сборочных единиц и отдельных деталей оборудования, вызванные неравномерностью нагрева его отдельных частей, обусловленной действием внешних и внутренних источников тепла. Термометрию закрытых механизмов оборудования выполняют с помощью термометров сопротивления, а температуру сборочных единиц с наружными поверхностями — термоиндикаторов плавления или термоиндикаторных красок. Термоиндикаторы изготавливают на основе суспензии соединений, чувствительных к изменению температуры, и наполнителей в лаке на основе синтетических смол. При достижении определенной температуры термоиндикаторы изменяют цвет. Термоиндикаторы по сравнению с термометрами сопротивления имеют ряд преимуществ: не требуют использования специальной измерительной аппаратуры, обладают широким диапазоном измерения температур, их можно использовать для определения температур подвижных деталей и узлов, они не разрушаются и не изменяют цвета при воздействии электрического тока различной частоты.

Прогнозирование отказов технологического оборудования

Одним из основных принципов ТОБ и ремонта технологического оборудования, работающего в составе автоматизированных станочных систем (АСС), основанном на техническом диагностировании, является предупреждение отказов оборудования при условии обеспечения максимально возможной его наработки. Основным элементом технической диагностики металлорежущего оборудования является прогнозирование. Цель прогнозирования — установление сроков безотказной работы элементов оборудования до очередного ТОБ, ремонта и предотвращения отказов. Для прогнозирования используют метод диагностирования состояния по параметру «длительность цикла». Применяют два вида прогнозирования технического состояния — вероятностное (среднестатистическое) и по реализации изменения значений параметров элементов конкретного оборудования.

Вероятностное прогнозирование основано на статистической обра-

ботке и анализе результатов, полученных в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации оборудования. Исходя из этого, устанавливают допустимые границы значений параметров, характеризующих параметры однотипного оборудования. При определении этих границ исходят из необходимости обеспечения допустимого уровня безотказной работы оборудования и минимальных суммарных затрат на его ТОБ. Вероятностное прогнозирование требует единой периодичности планового ТОБ для всей совокупности оборудования одного типа. Это упрощает планирование и организацию работ по ТОБ и ремонту оборудования, что является преимуществом этого вида прогнозирования. К его недостаткам относят: возможное недоиспользование ресурса оборудования, обусловленное единой периодичностью его ТОБ; возникновение отказов из-за рассеивания сроков безотказной работы однотипного оборудования.

Целью *прогнозирования по реализации* является выявление остаточного ресурса оборудования, который представляет собой продолжительность работы (наработки) оборудования после контроля его технического состояния до предельного состояния, т. е. до величины предельного износа элементов, недопустимого изменения качества изготавливаемых деталей, ухудшения технологических показателей. Прогнозирование по реализации основано на определении скоростей изменения значений параметров, характеризующих текущее состояние оборудования. Эти изменения определяют путем измерений и дальнейшей обработки результатов с учетом характера изменения контролируемых параметров. Прогнозирование по реализации обеспечивает более полное использование ресурса оборудования при одновременном повышении его надежности и долговечности. При использовании этого вида прогнозирования, например технического состояния АЛ из агрегатных станков с жесткой связью, выявляют отклонение параметра «длительность цикла» от начальной величины. Затем устанавливают наиболее вероятный объем ремонтных работ, выполнение которых обеспечит восстановление исправного состояния АЛ. Далее определяют величину оптимальной наработки АЛ с начала межремонтного периода, при приближении к которой эксплуатация АЛ не рациональна по экономическим соображениям. Для этого используют один из критериев оптимальности: максимальную производительность АЛ или минимальную себестоимость изготовления на АЛ одной детали. Для определения оптимального периода $T_{\text{опт}}$ эксплуатации АЛ при линейном изменении параметра диагностики по критериям оптимальности можно использовать зависимости:

по критерию максимальной производительности

$$T_{\text{опт}_1} = \sqrt{\frac{2\tau_n t_s}{\text{tg}\alpha}},$$

где τ_n — средняя величина начальной длительности цикла работы АЛ;
 t_n — время восстановления исправного состояния АЛ; $\operatorname{tg} \alpha$ — тангенс
 угла наклона прямой линии, характеризующей изменение параметра диа-
 гностики к оси абсцисс;

по критерию минимальной себестоимости обработки одной детали:

$$T_{\text{опт}_2} = \sqrt{\frac{2\tau_n t_n (C_0 + C_1 t_n)}{C_0 \operatorname{tg} \alpha}},$$

где C_0 — стоимость затрат на последующее изготовление одной не изго-
 товленной детали; C_1 — стоимость единицы времени выполнения ремон-
 тных работ.

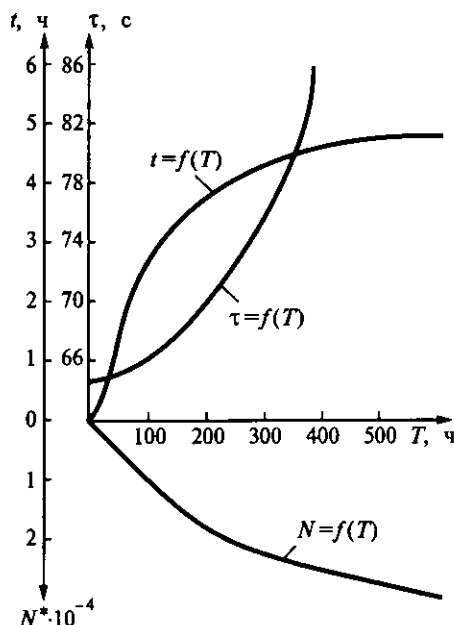


Рис. 3.44. Диаграмма прогнозирования эффективности функционирования АЛ

В условиях производства для сокращения затрат на определение про-
 гнозируемого периода работы АЛ используют диаграммы прогнозирова-
 ния эффективности функционирования, приведенные на рис. 3.44. На диа-
 грамме представлены графики изменения средней величины длительности
 цикла работы АЛ от наработки $t=f(T)$, зависимости изменения времени
 выполнения ремонтных работ от наработки $\tau=f(T)$, изменения количества
 N циклов, отработанных АЛ, от наработки $N=f(T)$. Диаграмма дает воз-
 можность прогнозировать наработку как в часах (T), так и в циклах (N).

Определение состава системы диагностирования технологического оборудования

Система диагностики на различных этапах функционирования решает ряд конкретных технических задач. Можно выделить два основных этапа функционирования указанной системы — обучение и эксплуатацию.

На первом этапе в функции системы диагностики входит определение совокупности i -х диагностируемых параметров j -х физических состояний объекта диагностики, которые наиболее предпочтительны для оценки его работоспособности в рассматриваемых условиях эксплуатации. На данном этапе определяют уровни допустимых состояний объекта диагностирования, устанавливают их взаимосвязь с возможными причинами отказов. Для большинства функциональных элементов технологического оборудования можно выделить четыре предельных уровня, которые соответствуют четырем следующим состояниям: работоспособному, когда выходные параметры изделия находятся в допустимой зоне изменений, которую устанавливают исходя из заданных эксплуатационных показателей; предельно допустимому работоспособному, когда выходные параметры изделия находятся у одной из границ зоны предельно допустимых изменений; предварительному; катастрофическому. Итогом этапа обучения является разработка словаря информативных признаков отказов технологического оборудования.

На втором этапе система диагностики оперативно определяет отказы элементов объекта диагностирования за счет непрерывного сопоставления его текущего состояния с перечнем наиболее вероятных отказов. На этом этапе результатом работы системы диагностики является выработка управляющих команд по аварийной остановке технологического оборудования или выработка технологических мероприятий по обеспечению его работоспособного состояния в течение всего непрерывного периода функционирования.

Для решения указанных задач по обеспечению работоспособности технологического оборудования структуру системы его диагностирования формируют из ряда взаимосвязанных функциональных блоков.

Представленная на рис. 3.45 блок-схема системы диагностирования является общей для всех типов технологического оборудования АСС. Ряд блоков системы, таких, как БФДИ, БУ, БФУК и др., можно реализовать на базе микроЭВМ, персонального компьютера или микропроцессора.

Любой элемент технологического оборудования АСС характеризуется определенной совокупностью из j физических состояний (электрическое, тепловое, вибрационное, размерно-геометрическое, упругоде-

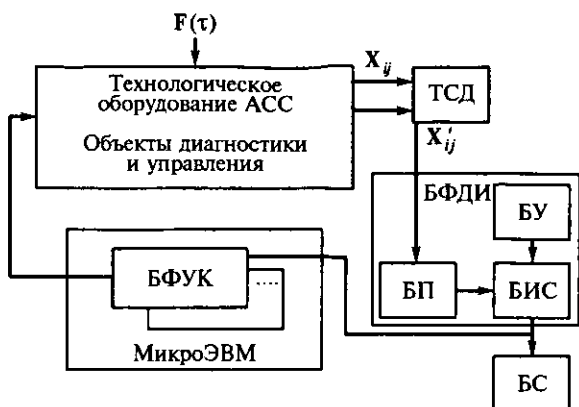


Рис. 3.45. Блок-схема системы диагностирования технологического оборудования АСС:

$F(t)$ — вектор дестабилизирующих возмущающих воздействий; X_{ij} — вектор состояния; X'_{ij} — вектор состояния измеренного значения; ТСД — техническое средство диагностики; БФДИ — блок формирования диагностической информации; БП — блок преобразований; БУ — библиотека уставок (предельно допустимых значений параметров); БИС — блок идентификации состояний; БС — блок сигнализации; БФУК — блок формирования управляющих команд

формационное), для каждого из которых объективно существует i диагностируемых параметров. Средство диагностики выдает сигнал, характеризующий состояние объекта диагностики. Затем БФДИ преобразует полученную диагностическую информацию согласно алгоритмам, разработанным как на этапе обучения, так и на этапе эксплуатации технологического оборудования. Далее БП трансформирует выданный сигнал $\bar{X}_{ij}$ в вид, удобный для последующего использования. В БУ содержится совокупность установок, которая получена на этапе обучения. Эта совокупность представляет собой набор эталонных диагностических сигналов, характеризующих возможные отказы элементов технологического оборудования. Затем блок идентификации состояний сравнивает текущую и эталонную диагностическую информацию и выдает решение о соответствии диагностируемого параметра допустимым уровням состояния. В результате этого блок дает заключение о текущем состоянии объекта диагностирования. Блок БФУК на основе измерения и анализа состояния технологического оборудования формирует управляющее воздействие на объект диагностирования, например команды для аварийного останова оборудования в случае катастрофического состояния диагностируемого элемента.

Основным элементом системы диагностики технологического оборудования являются технические средства диагностики (ТСД), которые

выполняют наиболее важное функциональное назначение — выдают первичную диагностическую информацию. От качества выполнения этой процедуры зависит работоспособность технологического оборудования в целом. Процедуру выбора ТСД можно реализовать посредством графов предпочтений.

Структура средств диагностики автоматизированного технологического оборудования

Для выполнения оперативной технической диагностики станочного оборудования АСС целесообразно использовать встроенную структуру средств диагностики.

Существует ряд схем (рис. 3.46) применения встроенного средства диагностики (ВСД): вместо одной определенной штатной детали узла станка (рис. 3.46, а); дополнительно к конструкции штатной детали узла станка (рис. 3.46, б и в). Последние две схемы отличаются друг от друга исполнением и взаимодействием основных компонентов: чувствительного элемента (ЧЭ) и первичного неэлектрического преобразователя (ПНП). Реализуемое по любому из указанных вариантов ВСД имеет ряд

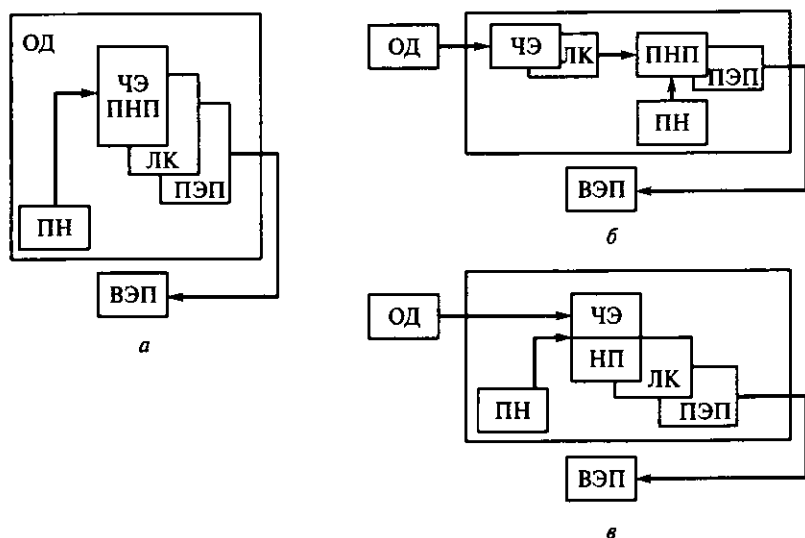


Рис. 3.46. Схемы применения ВСД:

а — вместо диагностируемой детали узла станка; б, в — дополнительно к конструкции штатной детали узла станка; ОД — объект диагностики; ЧЭ — чувствительный элемент; ПНП — первичный неэлектрический преобразователь; ЛК — локализация контакта; ПЭП — первичный электрический преобразователь; ПН — предварительный натяг; ВЭП — вторичный электрический преобразователь

преимуществ по сравнению с внешними средствами диагностики: высокую надежность работы, обусловленную защищенностью от внешних дестабилизирующих воздействий; инвариантность конструкции относительно геометрических параметров и материалов используемого инструмента, конфигурации и материала обрабатываемых заготовок, а в ряде случаев — к группе станочного оборудования; блочно-модульный принцип построения основных функциональных компонентов; сохранение первоначально имевшихся эксплуатационно-технических характеристик оборудования; свободное рабочее пространство оборудования; незначительные затраты на реализацию.

Диагностирование станочного оборудования АСС можно выполнять по любому из следующих физических состояний: электрическому, тепловому, размерно-геометрическому, вибрационному и упругодеформационному. Последнее дает наиболее полную характеристику функционирования оборудования. Для анализа упругодеформационного состояния узлов станочного оборудования ВСД должно иметь структуру, в которую входят следующие функциональные элементы: ЧЭ, ПНП, первичный электрический преобразователь (ПЭП), вторичный электрический преобразователь (ВЭП). Основным элементом ВСД является ПНП. Для обеспечения его работоспособности необходимо создать предварительный натяг для локализации контакта между сопрягаемыми поверхностями ЧЭ и ПНП с объектом диагностики (ОД). Эти функции осуществляют посредством элементов предварительного натяга (ПН) и локализации контакта (ЛК). Указанные элементы реализуют на базе штатных деталей станка или дополнительно изготавливаемых узлов. Каждый элемент ВСД имеет определенное функциональное назначение. Чувствительный элемент воспринимает физическую величину (диагностируемый параметр), которая является характеристикой состояния ОД. В функции ПНП входит масштабное преобразование неэлектрического сигнала, вызванного трансформацией параметра диагностики, в другую физическую величину, более удобную для дальнейшего восприятия и преобразования. Первичный электрический преобразователь обеспечивает промежуточное преобразование неэлектрического сигнала, который преобразует диагностируемое состояние ОД в пропорциональный электрический сигнал. Вторичный электрический преобразователь служит для последующего активного или пассивного преобразования электрического сигнала с целью дальнейшего его использования.

Для анализа упругодеформационного состояния ОД функции ПЭП выполняют тензорезисторы, которые трансформируют упругие деформации ПНП в пропорциональные электрические сигналы. В качестве ВЭП используют тензоусилители.

Для создания предварительного натяга в ПНП применяют как штат-

ные детали ОД, так и дополнительно введенные в конструкцию ВСД узлы. Элементы приведенной на рисунке структуры представляют собой электрический динамометр, который обеспечивает электрическое измерение механической величины — силы нагружения ОД.

В конструкциях ВСД один из элементов структуры может выполнять функции нескольких элементов. Чаще в одном элементе объединяются функции ЧЭ и ПНП. Это упрощает конструкцию ВСД, уменьшает количество составляющих деталей, повышает надежность работы ВСД. Однако в конструкциях ВСД, которые имеют элементы, отдельно выполняющие функции ЧЭ и ПНП, путем максимального приближения размеров и форм ПНП к размерам и форме высокоинформативных типовых упругих элементов можно обеспечить большую чувствительность к изменению диагностируемого деформационного состояния.

Система диагностирования режущего инструмента

Эффективность эксплуатации АСС во многом зависит от организации, конструкции и качества работы системы диагностики, состояния режущего инструмента (СДРИ). Основные требования к СДРИ и к индикатору контакта (косвенный контроль размерного износа инструмента или же прямой контроль инструмента) определяются на основании анализа параметров действующих АСС и классификатора существующих устройств контроля состояния режущего инструмента.

1. СДРИ должна включать в себя следующие датчики: тензометрические (втулки или подшипники) в опорах ходовых винтов приводов продольной и поперечной подачи и в опорах шпиндельного узла; шунты в электрических цепях приводов подачи и главного привода (токовые датчики); пьезоэлектрические датчики виброакустической эмиссии; видеокамеру на ПЗС (приборах зарядовой связи). Состав СДРИ может уточняться в зависимости от конкретного типа оборудования.

2. СДРИ должна обеспечивать задание параметров для диагностики режущего инструмента, дифференцированных в зависимости от типа инструмента и режимов резания, на которых осуществляется обработка этим инструментом. Параметры диагностики должны быть разделены на группы в зависимости от их физического смысла и частоты использования: настроечные параметры, которые обеспечивают электрическую стыковку с гибким производственным модулем (ГПМ) и изменяются оператором ГПМ очень редко; инструментальные данные, которые изменяются или вновь задаются при изменении инструментальной наладки; данные кадров программы контроля для СДРИ, которые содержат информацию о каждом контролируемом проходе обработки и изменяются при отладке и работе очень часто.

Параметры диагностики должны вводиться в СДРИ либо с клавиатуры, расположенной на передней панели СДРИ, либо передаваться по каналам электроавтоматики из управляющей программы (УП) устройства числового программного управления (УЧПУ) станком (в зависимости от конфигурации УЧПУ и СДРИ).

3. При обнаружении хотя бы одного из перечисленных отказов СДРИ должна выдавать на выходные разряды (клеммы) сигналы, дифференцированные в зависимости от вида отказа. Допустимо использование различных разрядов (клемм) для разных выходных сигналов об отказе режущего инструмента.

4. Клавиатура и дисплей СДРИ должны быть расположены на одном расстоянии от пола с клавиатурой и дисплеем УЧПУ для обеспечения удобства работы с СДРИ.

5. В СДРИ необходимо предусмотреть следующие режимы работы: обучение, контроль, автономный. В режиме обучения СДРИ осуществляет запись в память значений нагрузки (крутящего момента приводов, составляющих силы резания, уровня виброакустической эмиссии и др.) на проходах, отмеченных в УП свободно программируемыми М-командами. В режиме контроля СДРИ осуществляет диагностирование отказов режущего инструмента по результатам опроса всех датчиков системы и выдачу на выходные разряды (клеммы) дифференцированного (в зависимости от вида отказа) выходного сигнала. В автономном режиме СДРИ обеспечивает возможность отладки параметров диагностики. В режиме обучения СДРИ обеспечивает возможность имитации процесса диагностики режущего инструмента при моделировании различных отказов инструмента.

6. Во всех режимах работ СДРИ должна иметь защиту «от дурака», т. е. блокировать все неправильные нажатия на клавиатуру, а при последовательном трехкратном неправильном нажатии на клавиатуру запрашивать цифровой или символьный пароль, без ввода которого блокируется дальнейшая работа СДРИ в режимах обучение и контроль.

7. Индикатор контакта должен состоять из интерфейса связи с УЧПУ, измерительных головок (ИГ) для измерения детали и инструментов, приемопередающего модуля (индуктивного или на инфракрасных лучах) и программного обеспечения, поставляемого вместе с УЧПУ или с индикатором контакта.

8. Индикатор контакта должен быть укомплектован щупами различной длины и конфигурации с наконечниками из твердого сплава или из синтетического материала повышенной твердости (типа искусственного рубина). В автоматическом цикле контроля детали на станке в инструментальной наладке следует предусмотреть соответствующее количество измерительных головок.

9. Индуктивный приемник информации должен располагаться на неподвижной части револьверной головки ГПМ с минимальным зазором относительно измерительной головки, определяемым поперечным биением поворотной части револьверной головки. Приемник информации должен быть защищен от попадания СОЖ.

10. Индикатор контакта должен отвечать требованиям, отраженным в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Технические требования к индикаторам контакта

Параметры	Предельные значения
Погрешность измерения, мм	0,002
Повторяемость, мм	$\pm 0,001$
Перебег шупа ИГ, мм	4 по оси x
	2 по оси z
Давление измерения, кг	Не выше 0,10 по оси x
	0,15 по оси z
Допустимая скорость подвода ИГ, мм/мин	2 ... 300

Определение рационального параметра диагностики технологического оборудования

Станочное металлообрабатывающее оборудование можно отнести к классу больших технических систем, в которых составляющие подсистемы объединены материальными, энергетическими и информационными связями. В процессе эксплуатации под действием различных видов энергии (потенциальной, т. е. накопленной в деталях и узлах станка при их изготовлении, кинетической, связанной с движением узлов; энергии окружающей среды) в узлах станка происходят различные физические явления. Каждое из явлений можно оценить каким-либо информативным параметром, подлежащим контролю. Выделяют следующие физические состояния, которые дают наиболее полную характеристику работы станка: электрическое, тепловое, размерно-геометрическое, вибрационное, упругодеформированное. Каждое из них образует в пространстве параметров области состояний с допустимыми значениями контролируемых параметров. Взаимное пересечение областей дает расчетную область работоспособности станка.

Можно выделить область допустимых значений параметров, харак-

теризующих такое физическое состояние станка, при котором его выходные параметры будут находиться в пределах, нормируемых для станка данного класса точности. Выходные параметры можно оценить качеством изготовления деталей и техническими характеристиками оборудования: жесткостью, виброустойчивостью, теплостойкостью и др., а также посредством экономических показателей эффективности процесса обработки — себестоимостью изготовления изделия, производительностью.

Станок с входными и выходными характеристиками подвергается в процессе эксплуатации воздействию ряда дестабилизирующих факторов. Его можно представить в виде объекта, на который распространяются принципы автоматического управления. Возможность оценки станочного оборудования по физическим состояниям и его представление как автоматически функционирующего объекта позволяет строить систему диагностики и автоматического управления.

Информативные параметры состояний оборудования являются признаками, по которым диагностируют текущее состояние станка. Признаки, значения которых практически остаются постоянными для группы однотипных станков, имеющих на момент аттестации одинаковое состояние, являются наиболее ценными.

Для определения диагностически ценных признаков используют метод сравнения вероятностных характеристик признаков. Для заданного алфавита состояний S_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) выбирают априорный словарь признаков X_j ($j = 1, 2, 3, \dots, A$), с неизвестными условными плотностями распределения $F_i(X_j)$ и, наоборот, известными первыми n_{ji} и вторыми E_{ji} моментами распределений и априорными вероятностями $P(S_i)$. Затем оценивают качество признаков X_j . Если диагностируемый узел оборудования имеет значение j -го признака с вероятностями, которые равны априорным вероятностям $P(S_i)$, то определяют математическое ожидание фиктивной случайной величины, принимающей значения n_{ji} с вероятностями $P(S_i)$ по формуле

$$M[n_{ji}] = \sum_{i=1}^n n_{ji} P(S_i), \quad (3.22)$$

а также математическое ожидание дисперсии j -го признака по состояниям:

$$M[E_{ji}] = \sum_{i=1}^n n_{ji}^2 P(S_i). \quad (3.23)$$

Если $M[E_{ji}] < M[E_{mi}]$, то качество признака X_j выше качества признака X_m . График зависимости $F(X_j)$ предпочтительного признака вдоль оси абсцисс (рис. 3.47, а) более компактен, чем график зависимости $F(X_m)$ (рис. 3.47, б).

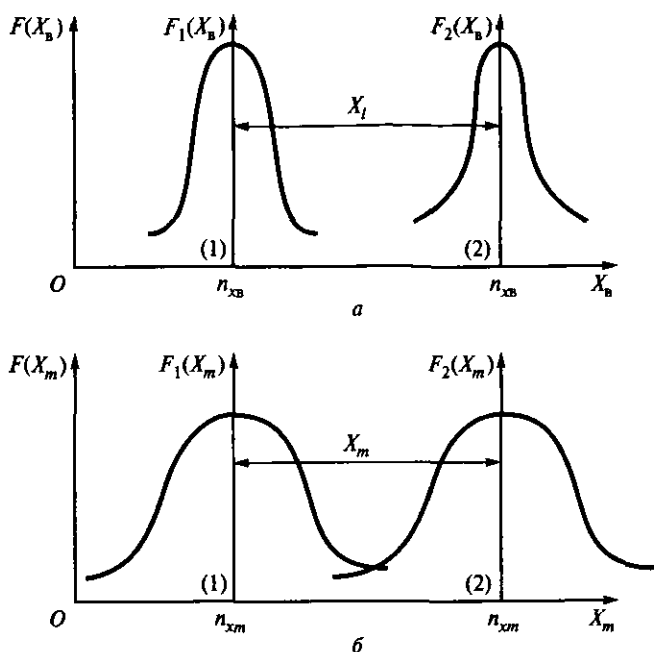


Рис. 3.47. Графики зависимости:
а — $F(X_b)$; б — $F(X_m)$

Дисперсия математического ожидания распределений признаков при переходе из одного состояния в другое определяется по формуле

$$\bar{E}_{ji} = [n_{ji} - M(n_{ji})]^2. \quad (3.24)$$

Если $\bar{E}_{ji} > \bar{E}_{mi}$, то при прочих равных условиях качество признака X_i выше качества признака X_m . На графике зависимости $F(X_i)$ предпочтительного признака расстояние ΔX_i больше, чем аналогичное расстояние ΔX_m для предпочтительного признака зависимости $F(X_m)$. За критерий выбора признака принимают величину

$$V_j = \frac{M[E_{ji}]}{\bar{E}_{ji}}. \quad (3.25)$$

Если $V_i < V_m$, то качество признака X_i выше качества признака X_m и лучшим является признак, реализующий условие

$$\min_{V_j} = \min_j \left\{ \frac{M[E_{ji}]}{\bar{E}_{ji}} \right\}. \quad (3.26)$$

Сопоставление параметров физических состояний на основе метода

сравнения вероятностных характеристик признаков дает возможность выявить наиболее информативный параметр, например упругие деформации элементов технологической системы.

Модели контрольных операций при черновой обработке заготовок

Проектирование и анализ диагностических систем проводят на основе математических моделей. Рассмотрим математическую модель контрольных операций при обработке заготовки лезвийным инструментом в автоматизированных станочных системах. Модель предназначена для использования в работе экспертной системы обеспечения качества продукции АСС механообработки.

Эффективная эксплуатация АСС с минимальным участием обслуживающего персонала практически невозможна без автоматизации процесса диагностики состояния режущего инструмента, т. е. без автоматического распознавания его поломок и недопустимого износа. В АСС механообработки преобладают операции, выполняемые лезвийным режущим инструментом. Для диагностики состояния указанного инструмента на черновых операциях, выполняемых в АСС, используют контрольно-измерительные машины (КИМ) типа «инструментальный монитор», функции которых заключаются в сравнении (контроле) величины силы тока двигателя привода главного движения станка с заданным значением (уставкой), записанной в память монитора. Информация о ходе обработки, получаемая путем измерения величины силы тока двигателя привода главного движения станка, является достаточно достоверной, так как этот параметр функционально связан с одной из составляющих вектора силы резания.

Действительно, эффективная мощность $N_{\text{эф}}$, потребляемая на резание лезвийным инструментом, определяется зависимостью

$$N_{\text{эф}} = \frac{P_z V}{60 \cdot 102}, \quad (3.27)$$

где P_z — тангенциальная составляющая силы резания; V — скорость резания.

Из формулы следует, что при $V = \text{const}$ мощность $N_{\text{эф}}$ пропорциональна P_z , т. е. $N_{\text{эф}} = k P_z$. Заготовка или инструмент получают вращение в процессе обработки от электродвигателя через механическую передачу. Зависимость, определяющая связь между $N_{\text{эф}}$ и электрическими параметрами, характеризующими мощность электродвигателя, имеет следующий вид:

$$\sqrt{3} UI \cos \varphi \eta \cdot 10^{-3} = N_{\text{эф}}.$$

Здесь U — линейное напряжение; I — линейный ток (ток статора электродвигателя); φ — угол сдвига по фазе между током и напряжением; $\eta = \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{р}}$ — КПД привода ($\eta_{\text{эл}}$ — КПД электродвигателя привода; $\eta_{\text{р}}$ — КПД редуктора).

Подставив в исходное уравнение (3.27) вместо $N_{\text{эф}}$ данное выражение, получим зависимость:

$$\sqrt{3}UI \cos \varphi \eta \cdot 10^{-3} = \frac{P_z V}{60 \cdot 102}.$$

Отсюда следует, что

$$P_z = \frac{(60 \cdot 102 \cdot \sqrt{3})(UI \cos \varphi \eta)}{10^{-3} V}. \quad (3.28)$$

В случаях, когда изменение параметров U , $\cos \varphi$, η находится в пределах 10...15%, можно считать, что между P_z и током электродвигателя главного привода существует пропорциональная зависимость, т. е. $P_z = kI$. Выбор тока статора в качестве параметра, характеризующего изменение составляющей P_z силы резания, правомерен с определенным приближением, так как параметры U , $\cos \varphi$, η в процессе обработки могут изменяться, вызывая погрешность измерения.

При контроле черновых операций инструментальным монитором могут возникать два фактора, которые определяют эффективность работы технологического оборудования АСС. Первый заключается в том, что малая уставка (допустимое поле $P_{\%}$, отклонение силы тока привода главного двигателя), которую определяет оператор, приводит к увеличению ложных (ошибочных) срабатываний монитора (рис. 3.48). В автоматическом режиме работы технологического оборудования при поступлении сигнала от монитора (ложного или правильного) робот, обслуживающий станок, должен вынуть дефектный резец (на который указал монитор), установить новый резец, вынуть дефектную деталь (дефектная или нет, определяет оператор), установить новую заготовку, после чего происходит повторное включение станка. Каждый ложный сигнал приводит к потере времени и средств. Эти издержки для каждого конкретного производства оценивают весовым коэффициентом C'' , учитывающим дополнительное время (стоимость), которое необходимо для устранения ложной конфликтной ситуации роботу или оператору. Экспериментальные исследования позволили определить общий вид графика зависимости частоты ложных срабатываний $n(P)$ монитора от величины $P_{\%}$ (рис. 3.49).

Второй фактор заключается в том, что при повышении значения уставки $P_{\%}$ увеличивается риск того, что монитор своевременно не определит, т. е. не идентифицирует, реальную поломку инструмента. Связанные с этим временные и стоимостные потери оценивают весовым



Рис. 3.48. Связь величины допустимого поля отклонения силы тока P_{κ} с пределами уставок

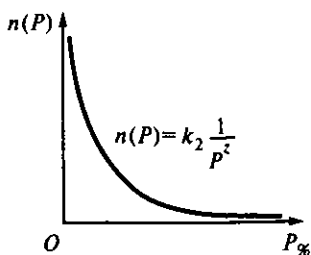


Рис. 3.49. Зависимость частоты ложных срабатываний монитора $n(P)$ от величины P_{κ}

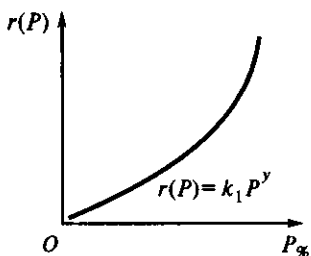


Рис. 3.50. Зависимость частоты несрабатываний монитора $r(P)$ от величины P_{κ} при неидентифицируемых поломках инструмента

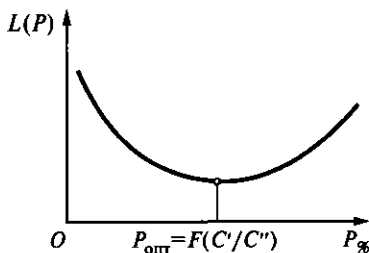


Рис. 3.51. График определения минимума целевой функции

коэффициентом C' , учитывающим дополнительное время (стоимость), которое определяется необходимостью устранения брака. График зависимости частоты несрабатываний монитора от величины P_{κ} при неидентифицируемых поломках инструмента $r(P)$ (например, выкрашивание режущей кромки) представлен на рис. 3.50.

Цель работы экспериментальной системы состоит в определении минимума целевой функции $L(P) = \{r(P)C' + n(P)C''\} \rightarrow \min$ (рис. 3.51). При этом используют конкретные значения для данного предприятия. Для эффективной работы ЭС в ее базу данных (БД) должна быть введена информация об опыте изготовления реальных партий деталей. Минимум целевой функции $L(P)$ для одного предприятия (для его конкретных условий) не обязательно является минимумом для другого предприятия. Коэффициенты и показатели степенных функций, а также экстремум функции $L(P)$ для эксплуатируемых АСС определяют экспериментально.

Модели контрольных операций при чистовой обработке

Рассмотрим математическую модель контрольных операций при чистовой (финишной) обработке заготовок лезвийным инструментом в автоматизированных станочных системах механообработки. Модели предназначены для использования в работе экспериментальной системы обеспечения качества продукции АСС.

При контроле чистовых (финишных) операций ставят несколько целей, основными из которых являются следующие: контроль каждой детали для обеспечения максимальной точности обработки (например, при изготовлении деталей, не являющихся характерными для данного типа производства и технологического оборудования), обеспечение стабильности требуемой точности обработки при минимизации времени выполнения контрольных операций (максимизация числа неконтролируемых деталей).

В первом случае время контрольных операций не лимитируется. Для достижения первой цели строят математическую модель, которую затем используют для создания методики организации подналадок режущего инструмента (для указанной экспериментальной системы) и специального программного обеспечения устройства ЧПУ станка.

Обычно модель исходного процесса представляет собой нормальный марковский стационарный процесс, наложенный на линейную функцию. При построении модели рассматривают два параметра: величину дисперсии исходного процесса и коэффициент корреляции. Дисперсия регулируемого параметра зависит от дисперсии исходного процесса, закона регулирования, характеристики точности измерительных средств. В качестве измерительных средств можно использовать как контактные измерительные датчики, так и любые виды КИМ, точность которых оценена и введена в качестве информации в БД ЭС. Контрольно-измерительные средства оценивают дисперсией измерения, которая определяется погрешностью прибора и погрешностью позиционирования станка (устройство ЧПУ и кинематика станка) при измерении. Для оценки дисперсии следует или обработать 25–30 деталей перед запуском реальной партии, или использовать опытные данные по обработке аналогичных деталей в прошлом.

Правильно составленная методика подналадки режущего инструмента, при реализации которой контролируется каждая изготавливаемая деталь, позволяет компенсировать как систематические, так и случайные погрешности, в результате чего можно обеспечить достижение точности по шестому качеству на токарных станках с ЧПУ при выходе годных деталей более 95 %.

Для достижения второй цели также необходимы математическая модель, методика организации подналадок режущего инструмента и специальное программное обеспечение для системы ЧПУ станка. Следует определить количество деталей, которые можно выпустить без контроля, но обеспечив при этом стабильность качества. Для компенсации систематической погрешности экспериментальным путем определяют усредненный размерный износ различных типов лезвийного режущего инструмента, приходящийся на одну деталь, при обработке тех или иных материалов на различных операциях. Эта величина автоматически вводится в кадр управляющей программы и суммируется (с соответствующим знаком) с величиной, характеризующей размер режущего инструмента в геометрическом корректоре.

Математическая модель дает возможность определить количество пропускаемых и неконтролируемых деталей из условия, что число деталей, вышедших за поле допуска, должно быть не более заранее установленного.

Спектрографический метод диагностирования технологического оборудования

Среди множества методов технической диагностики оборудования широко распространены методы диагностирования, в основе которых лежит определение содержания продуктов износа в смазывающем материале. При эксплуатации металлообрабатывающего оборудования детали узлов его механизмов подвержены изнашиванию. Отделяемые от поверхностей контактирующих деталей частицы материала попадают в смазывающий материал. Концентрация продуктов износа в масле пропорциональна интенсивности изнашивания деталей. Информация о химическом составе материалов трущихся деталей и статистические данные о сравнительной интенсивности изнашивания каждой из них дают возможность контролировать динамику изнашивания деталей.

Для качественной оценки продуктов износа в масле разработаны и используют колориметрический, полярографический, магнитно-индуктивный, радиоактивный методы. Наиболее часто для диагностирования оборудования применяют спектрографический метод, который дает возможность определять в пробах масла содержание любых материалов, применяемых в машиностроении. Это содержание находят путем разложения излучений продуктов износа, происходящих под действием вольтовой дуги, на отдельные спектры. Результаты анализа получают фотографированием спектров и их последующей расшифровкой. Анализ проб на автоматизированных установках осуществляется за 3 ... 4 мин. Существует две разновидности данного метода: предварительное озоление про-

бы масла и определение по составу золы содержания продуктов износа; непосредственный анализ жидкой пробы.

В первом случае пробу в 5–10 частях масла озолняют путем сжигания в тигле, затем прокалывают остаток в муфельной печи при температуре 600 ... 800 °С до полного удаления сажи. Полученную золу смешивают с тремя или более весовыми частями порошкообразного графита и фтористого лития, растирают и заполняют этой смесью кратер 2 нижнего электрода 3 генераторной установки (рис. 3.52).

При включении установки между верхним 1 и нижним 3 электродами возникает вольтова дуга. Смесь, находящаяся в кратере 2, испаряется, при этом создается свечение, которое направляется вначале в спектральный прибор и далее в регистрирующее устройство. Для количественной оценки концентрации определяемых элементов приготавливают эталоны из окислов таких же элементов, разбавляя их порошком графита и фтористого лития в определенной пропорции. Метод озолнения проб дает высокую точность контроля объектов, однако он сложен и трудоемок. Его использование для диагностики ограничено.

Во втором случае используют прямой спектральный анализ масел, что ускоряет и упрощает процесс анализа. Вращаясь с частотой 4–6 мин⁻¹, дисковый электрод 2 увлекает из тигля 4 масляную пленку 3 и равномерно подает ее в дуговой разряд между электродами 1 и 2 (рис. 3.53). Используя этот метод, можно определять в масле небольшие концентрации элементов (до 10⁻⁴ %).

Для спектрального анализа жидких проб масел можно использовать стандартную малогабаритную фотоэлектрическую установку, которая состоит из дугового генератора 3, штатива с электродами, спектрального прибора и измерительного устройства (рис. 3.54). В качестве спектрального прибора используется полихроматор, основным элементом которого является дифракционная решетка 1, которая служит для разложения общего светового излучения на отдельные спектры. Разложение происходит вследствие наличия на внутренней сферической поверхности решетки

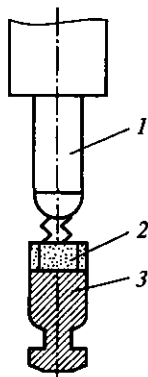


Рис. 3.52. Схема генераторной установки:

1 — верхний электрод; 2 — кратер; 3 — нижний электрод

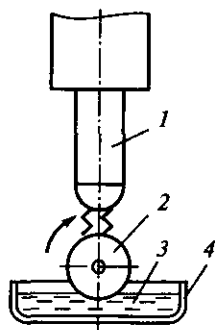


Рис. 3.53. Схема прямого спектрального анализа:

1, 2 — электроды; 3 — масляная пленка; 4 — тигель

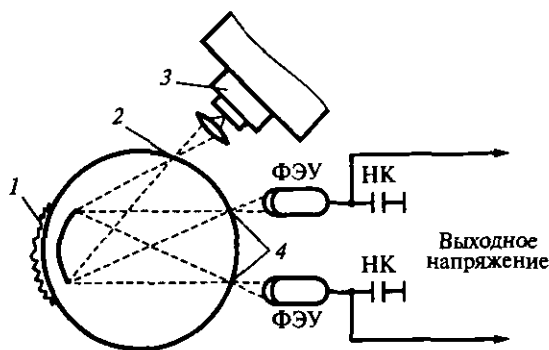


Рис. 3.54. Схема малогабаритной фотоэлектрической установки для спектрального анализа:

НК — накопительные конденсаторы; ФЭУ — фотоэлектронный умножитель; 1 — дифракционная решетка; 2 — входная щель спектрального прибора; 3 — дуговой генератор; 4 — выходные щели спектрального прибора

ки большого количества мелких зеркальных штрихов — 1200 штрихов на 1 мм. Каждая спектральная линия, отраженная дифракционной решеткой, является однородным монохроматическим излучением, имеющим определенную длину волны, присущую какому-либо одному элементу, содержащемуся в пробе масла.

Измерительное устройство содержит фотоприемники излучения, интегрирующие накопительные конденсаторы (НК) и регистрирующий прибор (вольтметр) для измерения выходного напряжения. В качестве приемников излучения можно использовать, например, фотоэлектронные умножители ФЭУ, которые преобразуют световую энергию в электрическую. В зависимости от количества приемных каналов одновременно можно определять содержание в пробе масла соответствующего количества различных элементов. Один ФЭУ, как правило, служит для приема излучения от эталонных образцов, на основе анализа которых строят тарировочные зависимости.

Излучение разряда, возникающего между электродами, куда помещена проба масла, подвергаемая испытанию, направляется во входную щель 2 спектрального прибора, отражаясь от дифракционной решетки, в виде монохроматического излучения проходит через выходные щели 4, откуда попадает на ФЭУ. На ФЭУ возникают электрические заряды, которые поступают на НК. Последние заряжаются. Напряжения зарядки НК пропорциональны усредненным за время анализа интенсивностям спектральных линий. Интенсивности, в свою очередь, зависят от количественного содержания в пробе анализируемых элементов. После окончания

анализа выполняется измерение напряжений. Чувствительность определения содержания в масле продуктов износа в виде железа, свинца и кремния равна 0,00001%. Использование данного метода диагностирования увеличивает межремонтный период эксплуатации оборудования.

Диагностирование технологического оборудования методом поверхностной активации

Для диагностирования состояния металлообрабатывающего оборудования часто используют методы радиоактивных индикаторов. Применение этих методов позволяет снизить затраты времени и материальных средств для получения достоверной информации об износе деталей и обеспечить автоматизацию контроля за износом деталей, узлов и механизмов в процессе эксплуатации оборудования. К основным методам внесения радиоактивных элементов (радионуклидов) в исследуемую деталь относят: активацию деталей в реакторе; добавление радионуклида в расплав материала, из которого изготавливают заготовки деталей; электроосаждение исследуемого материала на поверхность, подвергаемую изнашиванию; монтаж в деталь вставки с источником; введение радионуклида в поверхностный слой путем диффузии; электроискровую обработку трущейся поверхности радиоактивным электродом; поверхностную активацию детали за счет облучения пучком заряженных частиц; метод марок.

В производственных условиях наиболее часто применяют метод поверхностной активации или дифференциальный метод радиоактивных индикаторов. Этот метод рационально использовать для выполнения стендовых испытаний, а также в случаях, когда поставленную задачу диагностирования нельзя решить путем применения более простых и дешевых методов.

Реализация метода осуществляется за счет создания на поверхности трения контролируемой детали радиоактивной метки путем активации ускоренными заряженными частицами. Изотопный состав метки и распределение в ней активности по глубине зависят от материала, вида и энергии бомбардирующих частиц, геометрических параметров пучка облучения и могут регулироваться в зависимости от ожидаемой величины изнашивания на поверхности в области этой метки. При изнашивании контролируемой детали активность метки убывает по мере износа. Измерение изнашивания выполняется по жесткому γ -излучению, которое обладает высокой проникающей способностью. Это дает возможность выполнять непрерывный дистанционный контроль износа без остановки и демонтажа узла или механизма, в котором работает контролируемая деталь.

Для регистрации γ -излучения при диагностировании изнашивания используют детекторы γ -излучения: самогасящиеся счетчики Гейгера и сцинтилляционные детекторы, выполненные на основе неорганических кристаллических сцинтилляторов. Сцинтилляционный датчик устанавливают так, чтобы расстояние между чувствительным элементом и активированным участком контролируемой поверхности было минимальным. Относительное расположение датчика и контролируемой поверхности должно быть зафиксировано на все время диагностирования. При диагностировании измеряют интенсивность γ -излучения активированного участка поверхности детали. По результатам измерений и известной зависимости относительной убыли интенсивности излучения от величины линейного износа при эксплуатации определяют фактическую величину изнашивания детали.

Преимуществами данного метода являются: осуществление непрерывного контроля процесса изнашивания без прекращения трения; высокая разрешающая способность, обеспечивающая оценку изнашивания контактирующих поверхностей деталей с точностью порядка долей микromетра; практическое отсутствие влияния температур, давлений и ряда других физических параметров на результаты измерений; возможность дифференцированной оценки составляющей общего износа; незначительное время испытаний.

Вопросы для самопроверки

1. Из каких составляющих складывается баланс эффективности использования станков с ЧПУ? Как он зависит от надежности?
2. Что такое надежность и какое сочетание свойств она включает?
3. Отказ, виды отказов и их физический смысл.
4. Какие показатели используют для оценки надежности и их численные значения?
5. Виды связей в ТП, их параметры и взаимодействие.
6. Как влияют и связаны показатели надежности и производительности?
7. Как зависят и изменяются показатели надежности и производительности от времени эксплуатации изделий?
8. Какие методы повышения надежности используют на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации?
9. Меры по повышению надежности на начальной стадии проектирования.
10. Принцип избыточности при проектировании и его значение (роль).
11. Роль информативности в повышении надежности функционирования объектов.
12. Как осуществляется повышение надежности за счет организационной структуры производства?
13. За счет каких факторов повышают надежность конструкций (показать это на примере оригинальных конструкций приспособления и схвата)?
14. Связь между шероховатостью и износостойкостью поверхностей.
15. Пути повышения надежности инструментальной оснастки.

16. Какие факторы заложены в концепции создания надежного режущего инструмента и каковы результаты?
17. Что называют «глубиной диагностирования»?
18. Расположите в порядке возрастания требований к техническим характеристикам объекта понятия «работоспособность», «исправность», «функционирование».
19. Чем тестовая диагностика отличается от функциональной?
20. Чем характеризуют состояние диагностируемого механизма?
21. Для чего используют диагностические сигналы?
22. Сколько входов и выходов может иметь функциональный элемент диагностической модели?
23. Появление каких событий следует ожидать при неисправности и электроподогрева в системе смазки подшипников мощного редуктора?
24. Что означает двоичный код состояния 100 000 101 для графа причинно-следственных связей?
25. Какие сигналы используют для акустической диагностики механизмов?
26. Признаки классификации отказов технологического оборудования и методы его диагностирования.
27. Физические основы прогнозирования отказов технологического оборудования.
28. Какие основные элементы входят в состав средств диагностирования?
29. Перечислите основные требования, предъявляемые к системам диагностирования режущего инструмента.
30. Какие методы можно использовать для диагностирования режущего инструмента?
31. Какие методы применяют для моделирования контрольных операций при диагностике?
32. Физические основы спектрографического метода диагностики.
33. Как диагностируют оборудование методом поверхностной активации?

Глава 4

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

4.1. Обеспечение точности при изготовлении деталей на станках с ЧПУ

Станки с ЧПУ и процесс формирования точности обработки имеют ряд специфических особенностей по сравнению с обычными станками, что требует применения новых подходов и методов при разработке и управлении ТП. Управляющая информация станками с ЧПУ проходит сложные этапы преобразования по цепи «чертеж — деталь», на каждом из которых возникают характерные для станков с ЧПУ погрешности (рис. 4.1).

Исходная информация о детали заложена в числовом виде в чертеже (требования по точности, геометрическая и технологическая информация). В управляющей программе (УП) информация представлена в числовом виде (кодированная, например — пробивки на перфоленте). Все действия рабочего, связанные с изготовлением детали на обычном станке, выполняются на станках с ЧПУ в автоматическом режиме по УП. Устройство ЧПУ преобразует кодированную информацию в декодированную (последовательность управляющих сигналов U). Станок с ЧПУ выполняет автоматически одновременно две задачи:

- обеспечивает заданную в УП траекторию перемещения рабочих органов;
- обеспечивает требуемую скорость рабочих органов на каждом участке траектории.

При выходе рабочего органа станка в запрограммированную координату возникает погрешность позиционирования $\Delta_{\text{поз}}$, включающая погрешности: устройства ЧПУ $\Delta_{\text{п.у}}$; из-за дискретности $\Delta_{\text{д}}$; кинематическую $\Delta_{\text{к}}$; изготовления и наладки станка $\Delta_{\text{к.н}}$; динамическую $\Delta_{\text{дин}}$:

$$\Delta_{\text{поз}} = (\Delta_{\text{п.у}} + \Delta_{\text{д}} + \Delta_{\text{к}} + \Delta_{\text{к.н}} + \Delta_{\text{дин}}).$$

Точность позиционирования — точность выхода рабочего органа в запрограммированную координату — важнейшая (специфическая) характеристика станков с ЧПУ.

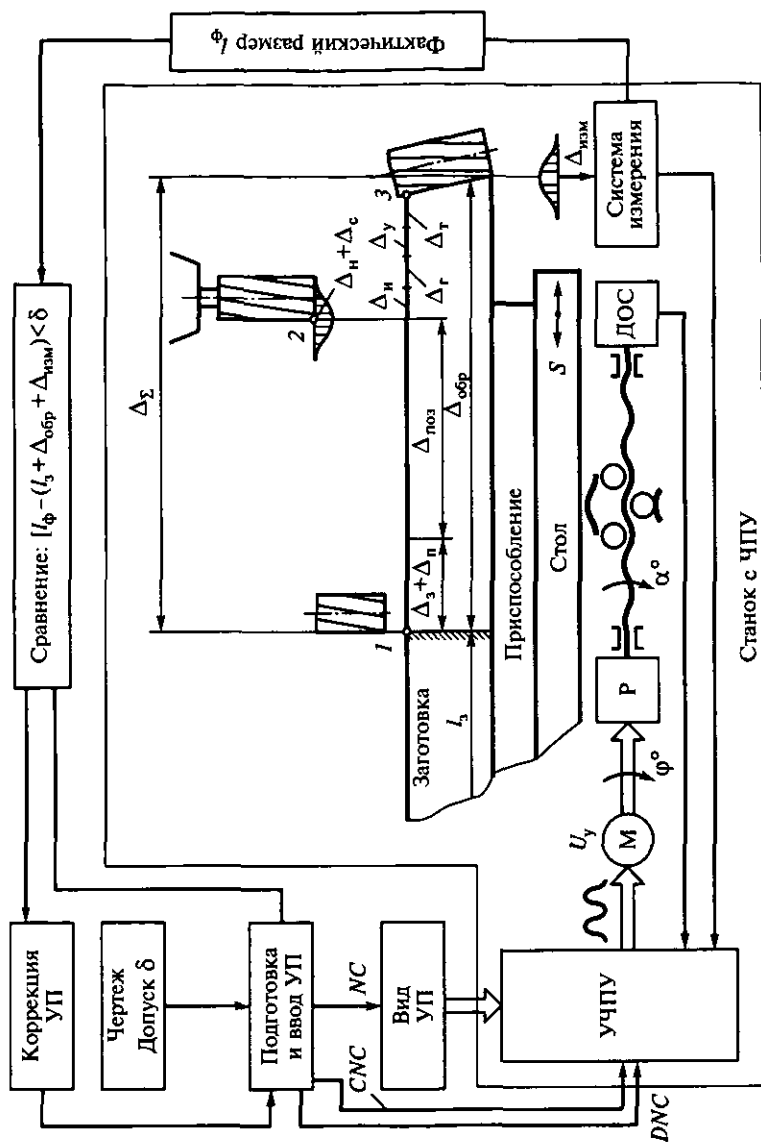


Рис.4.1. Физическая модель подготовки, ввода и преобразования управляющей информации и формирования точности на станках с ЧПУ

Точность обработки зависит от следующих погрешностей: заготовки Δ_z ; приспособления Δ_n ; от тепловых Δ_t и упругих Δ_u деформаций; геометрических Δ_r ; инструмента — Δ_m , Δ_s , Δ_k (наладки, смены, износа); измерения $\Delta_{изм}$. Из-за указанных погрешностей режущий инструмент (фреза) вместо запрограммированной точки 1 смещается вначале в точку 2 (до начала резания из-за погрешностей Δ_z , Δ_n , $\Delta_{поп}$), а затем — в точку 3 (при резании). Для получения годных деталей требуется, чтобы погрешность обработки фактическая Δ_ϕ была меньше δ , т. е. необходимо выполнение условия

$$\Delta_\phi = [I_\phi - (I_1 + \Delta_{обр} + \Delta_{изм})] < \delta,$$

где δ — заданный допуск.

При достижении Δ_ϕ предельного значения δ следует вводить коррекцию в УП.

Реальная траектория режущего инструмента (например, резца) отличается от запрограммированной из-за комплекса погрешностей: Δ_n и $\Delta_{с.и}$ — наладки и смены инструмента; Δ_n — позиционирования; Δ_z — заготовки (рис.4.2). Эти погрешности возникают до начала процесса резания (период T_0) и обуславливают зону рассеивания a_0 положения вершины резца Р относительно запрограммированной точки 1 — центра допуска на обработку δ .

В период формообразования T_ϕ возникают погрешности: геометрические Δ_r ; от быстро протекающих процессов Δ_6 ; от упругих Δ_u и тепловых Δ_t деформаций. Из-за погрешностей вершина резца смещается в точку 3, а затем в точку 4, 5 или 6 из-за износа U_i резца и зоны рассеивания U_p . Когда вершина резца достигнет границы допуска на обработку $+\delta$, произойдет отказ по точности.

Знаки плюс и минус указывают направление действия погрешностей. При плюсе размер детали увеличивается, при минусе — уменьшается. В зависимости от величины и направления действия погрешностей вершина резца может выходить за поле допуска δ во всем его диапазоне как в $+\Delta_i$, так и в $-\Delta_i$ — неисправимый брак.

Цель управления точностью — не допустить отказа по точности обработки. Необходимо создать такие условия, при которых вершина режущего инструмента (резца) не выходила бы за поле допуска. Для этого надо знать:

- общую погрешность, возникающую в процессе резания ($\pm\Delta_0$) и запас по точности обработки ($\pm\delta_r$);
- интенсивность изнашивания инструмента U_i за межналадочный период;
- расчетную зону подналадки $\delta_{п.и}$ и время подачи подналадочного импульса $T_{п.и}$ (условие $T_{п.и} < T_p$);

В общем случае погрешность обработки ($\pm\Delta_1$) за межналадочный период $T_{\text{мн}} = (T_o + T_{\text{ф}})$ с учетом вероятностного характера погрешностей можно рассчитать по формулам:

$$\begin{aligned}
 +\Delta_1 &= \Delta_0 + \Delta_{\text{н.р}} = \sum_{i=1}^9 \Delta_i + K_{\sigma} \sqrt{\sum \sigma_i^2} = \left\{ [(\bar{\Delta}_3 + \bar{\Delta}_{\text{н}} + \bar{\Delta}_{\text{с.н}} + \bar{\Delta}_{\text{п}}) + (\bar{\Delta}_{\text{г}} + \bar{\Delta}_6 + \bar{\Delta}_y + \right. \\
 &\quad \left. + \bar{\Delta}_{\text{т}}) + \bar{\Delta}_{\text{н.р}}] + K_{\sigma} \sqrt{[\sigma_3^2 + \sigma_{\text{н}}^2 + \sigma_{\text{с.н}}^2 + \sigma_{\text{п}}^2] + [\sigma_{\text{г}}^2 + \sigma_6^2 + \sigma_y^2 + \sigma_{\text{т}}^2 + \sigma_{\text{н.р}}^2]} \right\}; \\
 -\Delta_1 &= \sum_{i=1}^8 \Delta_i + K_{\sigma} \sqrt{\sum \sigma_i^2} = \left\{ [(-\bar{\Delta}_3) + (-\bar{\Delta}_{\text{н}}) + (-\bar{\Delta}_{\text{с.н}}) + (-\bar{\Delta}_{\text{п}})] + \right. \\
 &\quad \left. + [(-\bar{\Delta}_{\text{г}}) + (-\bar{\Delta}_6) + (-\bar{\Delta}_y) + (-\bar{\Delta}_{\text{т}})] + \right. \\
 &\quad \left. + K_{\sigma} \sqrt{[(-\sigma_3)^2 + (-\sigma_{\text{н}})^2 + (-\sigma_{\text{с.н}})^2 + (-\sigma_{\text{п}})^2] + [(-\sigma_{\text{г}})^2 + (-\sigma_6)^2 + (-\sigma_y)^2 + (-\sigma_{\text{т}})^2]} \right\},
 \end{aligned}$$

где $\bar{\Delta}_i$ — средние значения погрешностей; σ_i^2 — их дисперсии; K_{σ} — квантиль нормального распределения.

Поле рассеивания принимают равным $\pm 3\sigma$. Погрешности носят случайный характер и имеют рассеивание относительно средних значений. Среднее арифметическое отклонение $\bar{\Delta}$ характеризует систематическую составляющую погрешности, а среднее квадратическое отклонение σ — случайную.

На практике, как правило, используют два метода коррекции размеров: по результатам измерения отдельных параметров точности станка; по результатам измерения изготавливаемых деталей. Оба метода не позволяют автоматически управлять точностью по ряду причин: заранее неизвестна общая погрешность станка и запас по точности; необходимы периодические остановки станка для измерения деталей, обработка статистических данных, постоянное участие человека; нельзя заранее предусмотреть величину и время введения коррекции.

Для управления точностью обработки в автоматическом режиме можно использовать схему, представленную на рис. 4.2. На базе данной схемы, используя графо-аналитический метод, можно рассчитывать точность обработки и учитывать это еще на стадии подготовки УП. Графо-аналитическим методом можно рассчитывать общую погрешность станка с ЧПУ и запас точности при заданном допуске (разрешающую способность); определять время автоматической смены инструмента и введения коррекции (не допускать отказа по точности и брак); прогнозировать точность процесса обработки; строить точечную диаграмму рассеивания размеров до обработки; определять направление смещения настройки и величину рассеивания; делать пред-

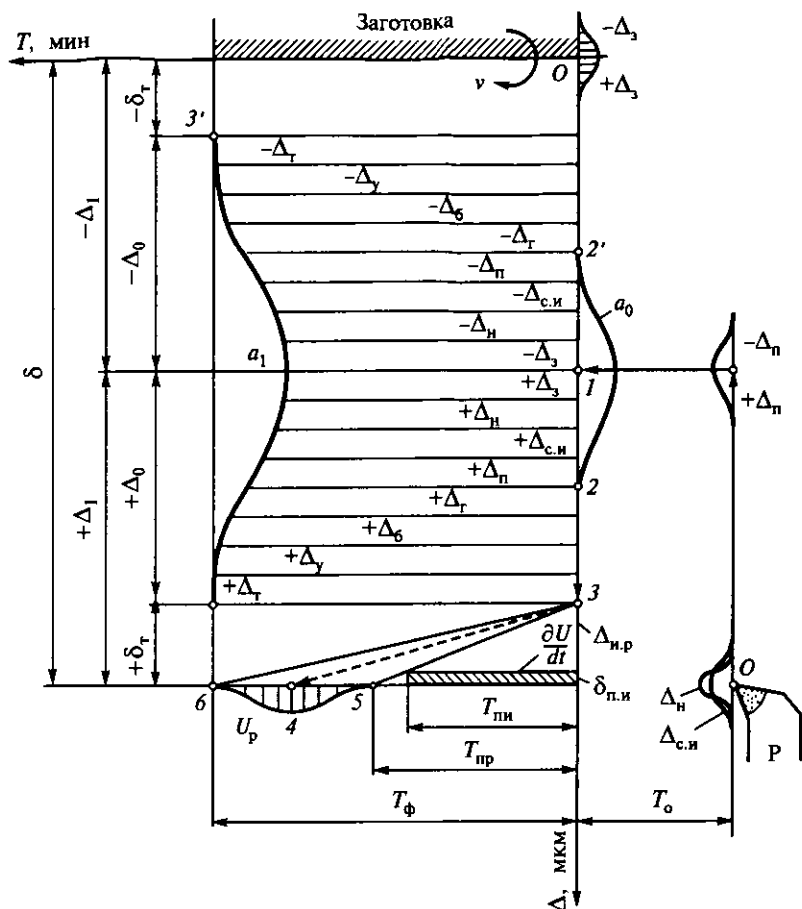


Рис.4.2. Схема расчета и управления точностью обработки на станках с ЧПУ

варительный графо-аналитический расчет точности (т. е. расчет реальной траектории инструмента и величины ее отклонений от заданной в УП); предусмотреть заранее коррекцию в УП.

Возможны два варианта выхода резца за поле допуска S (рис. 4.3).

Вариант I. Все погрешности имеют направление «от детали» (т. е. в плюс). Действительная траектория движения резца отличается от запрограммированной (центр допуска δ) из-за погрешностей $\Delta_{и.и}$, $\Delta_{поз}$, $\Delta_{заг}$, $\Delta_{г}$, $\Delta_{у}$, $\Delta_{г}$ и смещается в точку 3 (см. рис. 4.3). Остается запас (резерв) по точности на износ резца $\delta_r = 20$ мкм. Время наступления отказа будет зависеть от интенсивности износа резца $U_1, U_2, \dots, U_n$. Коррекция вводится в направлении минус в период $T_{п.и} < T_{пр}$, когда

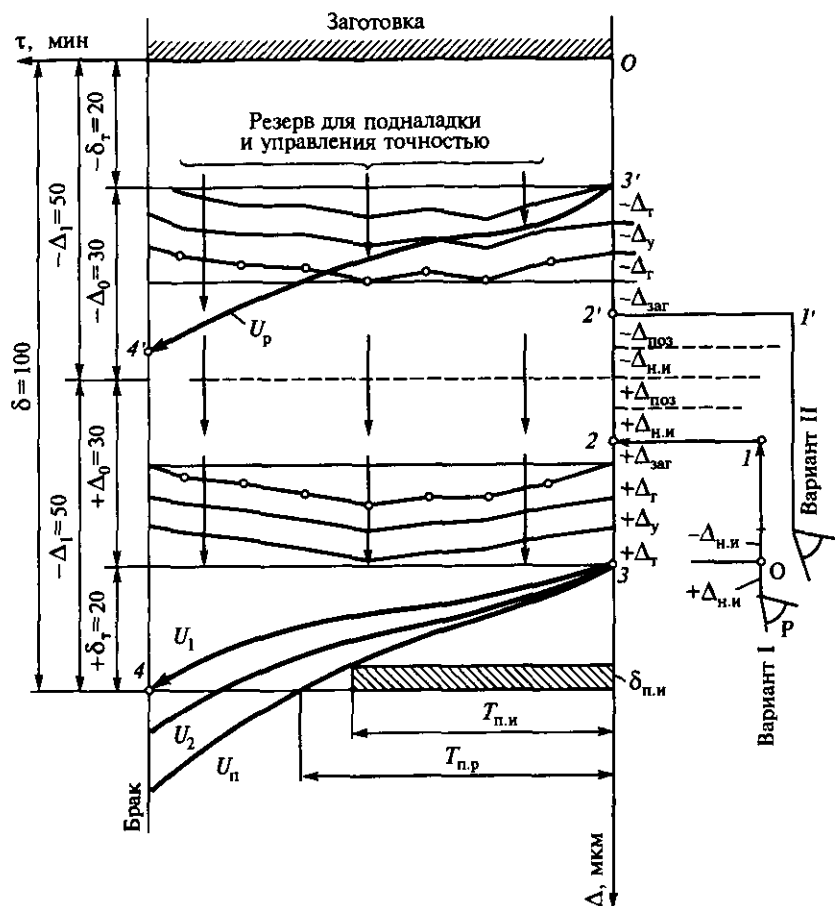


Рис. 4.3. Схема расчета, прогнозирования и управления точностью обработки на станках с ЧПУ с применением графо-аналитического метода (численные значения погрешностей приняты усредненными и равными 5 мкм)

вершина резца из-за износа входит в зону подачи подналадочного импульса $\delta_{п.и}$, равную $(+\delta_r - \frac{dU}{d\tau})$.

Вариант II. Все погрешности имеют направление «к детали» (т. е. в минус. Из-за погрешностей $(-\Delta_{н.и}; -\Delta_{поз}; -\Delta_{заг}; -\Delta_r; -\Delta_y; -\Delta_x)$ резец смещается в точку 3'. При резании погрешность из-за износа резца направлена в плюс (из точки 3' в точку 4') и компенсирует действие вышеуказанных минусовых погрешностей. Причем при обработке последующих заготовок увеличение износа резца будет увеличивать диапазон и воз-

возможности компенсации. При этом резерв ($-\delta, = 20$ мкм) может приближаться к $\delta = 100$ мкм (см. рис. 4.3). Такой большой диапазон позволяет вводить коррекцию положения резца, находить оптимальную зону для его траектории и тем самым повышать точность, надежность и производительность процесса обработки. Кроме того, можно максимально использовать и ресурс работоспособности резцов, доводя износ по задней грани до предельно допустимой величины. При подготовке УП можно также заранее предусмотреть количество подналадок и автоматический ввод коррекции, т. е. управлять точностью обработки без вмешательства человека и останова станка.

4.2. Построение операций на станках с ЧПУ

Станки с ЧПУ — высокопроизводительное, программно-управляемое технологическое оборудование с высоким уровнем автоматизации, широкими технологическими возможностями в сочетании с универсальностью и гибкостью. На станках с ЧПУ выполняется многокоординатная обработка деталей самой различной конфигурации — корпусных, тел вращения. Для обработки корпусных деталей целесообразно использовать обрабатывающие центры или многоцелевые станки (МС), которые позволяют обрабатывать за один установ до пяти поверхностей. При проектировании ТП для обработки заготовок на МС учитывают ряд особенностей.

1. Выполнение обработки базовых поверхностей за один установ, что позволяет исключить погрешности установки.

2. Минимизация количества смен инструментов и поворотов стола с деталью.

3. Выбор технологических переходов обработки элементарных поверхностей по технологическим схемам — комплексам переходов, необходимых для обеспечения требуемого качества обработки.

4. Назначение рациональной последовательности переходов: фрезерование внешних и внутренних поверхностей; обработка основных и вспомогательных отверстий большого диаметра; обработка вспомогательных отверстий малого диаметра.

5. Выбор последовательности переходов при обработке точных поверхностей устанавливают таким образом, чтобы суммарная погрешность обработки была минимальной.

При увеличении серийности корпусных деталей их обработку производят на переналаживаемых АЛ, агрегатных станках, модулях со сменными агрегатными головками, многоцелевых станках с использованием комбинированного инструмента.

Детали типа тел вращения обрабатываются в основном на токарных станках с ЧПУ и гибких модулях на их основе. Для повышения качества обработки применяют типизированную операционную технологию, при формировании которой всю поверхность заготовки представляют в виде основных и дополнительных поверхностей. Основные поверхности — цилиндрические и конические поверхности с криволинейными образующими; дополнительные поверхности — резьбовые поверхности, канавки на внутренних и наружных поверхностях. Маршрут обработки: черновая и чистовая обработка основных поверхностей, обработка дополнительных (неосновных) поверхностей.

При обработке крупных серий деталей типа тел вращения существуют некоторые особенности:

- применение инструментальных наладок последовательного и параллельного действия;
- оптимизация (минимизация) траекторий перемещения режущего инструмента;
- использование комбинированного и осевого мерного инструмента (зенкеры, развертки).

Принципы построения операций на станках с ЧПУ

Разработка ТП и построение операций на станках с ЧПУ требуют особых подходов в силу их специфики: работа по автоматическому замкнутому циклу; увеличение доли машинного времени до 80 % (у станков с ручным управлением — около 20 %); интенсивность протекания процессов при работе; высокая концентрация операций (возможность обработки до пяти поверхностей на позиции); наличие мощного инструментального обеспечения (до 100 и более инструментов с автоматической сменой по программе); автоматическая загрузка, разгрузка, обработка, контроль, транспортировка; возможность корректировки УП и быстрой переналадки; возможность выполнения на одном станке разнообразных технологических операций (расточных, сверлильных, фрезерных, токарных); использование стандартных циклов (например, при сверлении); возможность встраивания (стыковки) в организационную структуру АСУ ТП, реализация централизованного и локального (автономного) управления всем технологическим комплексом.

При разработке автоматизированных ТП используют современные системы проектирования и управления (САПР, САП, АСУ ТП, АСНИ) и ряд принципов.

1. Комплексный (системный) подход при решении проблем автоматизации производства.
2. Рациональная дифференциация и концентрация операций.

3. Всеобъемлющая автоматизация процессов и операций («загрузка-выгрузка», транспортирование, механообработка, контроль, диагностика, управление).

4. Эффективное использование всех средств автоматизации (станков с ЧПУ, роботов, систем контроля и диагностика, микропроцессоров).

5. Реализация технологических принципов («безлюдная» и групповая технология, завершенность, оптимальность, интеграция, информационность).

6. Обеспечение высокого уровня надежности процессов (стабильность, такт, непрерывность, безаварийность, безопасность и экологичность),

7. Обеспечение высокого качества продукции при заданной производительности. Эффективность производства.

8. Возможность централизованного и локального (автономного) управления. Адаптация к инвариантной (базовой) структуре управления производством.

В процессе проектирования последовательно решают ряд специфических задач.

1. Анализ исходных данных. Делают анализ служебного назначения детали и ее конструктивных особенностей: годовая программа выпуска; габариты, вес и материал заготовки; конструктивные особенности (конфигурация, вид обрабатываемых поверхностей, параметры, требования по точности, качеству, твердости поверхностей). Определяют основные технологические задачи.

2. Анализ и повышение технологичности конструкции детали. Обеспечение технологичности деталей, изготавливаемых в условиях АП, приобретает особую актуальность, так как она во многом определяет эффективность, надежность, производительность, безопасность на всех стадиях изготовления деталей (операции загрузки—разгрузки, установки и зажима, транспортирования, контроля). Конструкция детали считается технологичной, если при ее изготовлении и эксплуатации затраты материала, времени и средств минимальны.

Существуют разные способы повышения технологичности: определение рационального количества и размеров ребер жесткости; расположение обрабатываемых отверстий на одном уровне; исключение отверстий или поверхностей, расположенных наклонно; исключение концентраторов напряжений; уменьшение вылета фрезы при фрезеровании; расположение шпоночных пазов с одной стороны детали. Уровень технологичности определяет уровень надежности технологической системы.

3. Расчет такта выпуска. Организационная структура участка (ко-

личество станков и других средств автоматизации) должна обеспечить выпуск установленного количества деталей. При этом необходимо обеспечить высокий коэффициент загрузки станков.

4. Выбор баз и проектирование маршрута обработки заготовок. При разработке и выполнении ТП следует соблюдать принцип совмещения и постоянства баз (конструкторских, технологических, измерительных). После фрезерно-центровальной операции базами являются торцы заготовок. После обтачивания получают базовые цилиндрические поверхности. Затем определяют последовательность операций.

5. Разработка операционной технологии. Проектирование операций начинается с формирования их состава. Формирование состава операций находится в прямой связи с составом технологических комплексов, т. е. групп поверхностей, обрабатываемых на одном установе. Выбирают станок с ЧПУ, автоматическое приспособление для зажима заготовки, режущий инструмент, робот (для загрузки).

6. Расчет припусков на механическую обработку. Расчет выполняют расчетно-аналитическим методом определения припусков.

7. Расчет режимов резания и норм времени. Черновые переходы следует выполнять с наибольшей глубиной резания t .

8. Расчет ожидаемой погрешности обработки.

9. Подготовка управляющей программы.

10. Выбор критериев оптимальности и технико-экономическое обоснование выбранного варианта. При проектировании ТП применяют ряд различных критериев оптимальности. Например, для оценки технологического перехода критерием оптимальности может быть технологическая производительность $Q = 1/t_p$ [шт/мин], где t_p — время рабочего хода.

Особенности изготовления деталей на станках с ЧПУ

Токарные станки. При изготовлении деталей на токарных станках с ЧПУ геометрические элементы и соответствующие им обрабатываемые поверхности заготовки принято делить на основные и дополнительные. К основным элементам контура принадлежат поверхности, которые могут быть обработаны резцом для контурной обработки с главным и вспомогательными углами в плане $\phi = 95^\circ$ и $\phi_1 = 30^\circ$ (проходные резцы при обработке наружных и торцовых поверхностей и расточные — для внутренних).

С учетом конфигурации обрабатываемого контура различают три зоны обработки — открытые, полуоткрытые и закрытые (рис.4.4). Вид зоны определяет ограничения на углы резца в плане и выбор схем переходов.

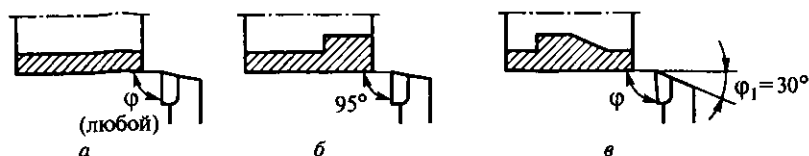


Рис.4.4. Зоны обработки:

а — открытые; б — полуоткрытые; в — закрытые

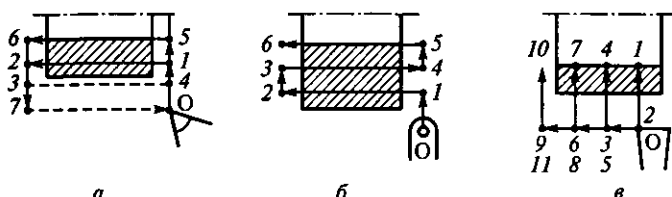


Рис. 4.5. Простейшие схемы переходов при обработке различных зон:

а — петля; б — виток; в — спуск

При подготовке УП используют типовые схемы переходов токарной обработки основных поверхностей.

1. По схеме «петля» (рис. 4.5, а) после рабочего хода 1–2 резец отводится от обработанной поверхности на 0,5 мм (в точку 3) и быстро возвращается назад (в точку 4). Затем аналогично выполняются остальные циклы. Эту схему применяют при обработке открытых и полуоткрытых зон.

2. По схеме «виток» (или «зигзаг») резец работает на прямой и обратной подаче (рис. 4.5, б). Схему можно применять при обработке зон всех видов.

3. По схеме «спуск» припуск снимается при радиальном перемещении резца (рис. 4.5, в). Схему часто используют при черновых переходах для закрытых зон.

4. По схеме «с подборкой» (рис. 4.6, а) резец после выполнения прямолинейного рабочего хода 1–2 движется дальше по наклонному контуру и срезает остатки материала (гребешки) на участке 2–3. Повысить качество обрабатываемых поверхностей и исключить в точках 2 и 11 риски (из-за радиуса резца при вершине) можно, если вводить перебеги резца в этих точках, равный половине радиуса инструмента при вершине.

5. По схеме выполнения черновых переходов для полуоткрытых зон с использованием черного и получистового (зачистного) прохода «подборка» материала после каждого рабочего хода не производится (рис. 4.6, б). После выполнения последнего черного прохода инстру-

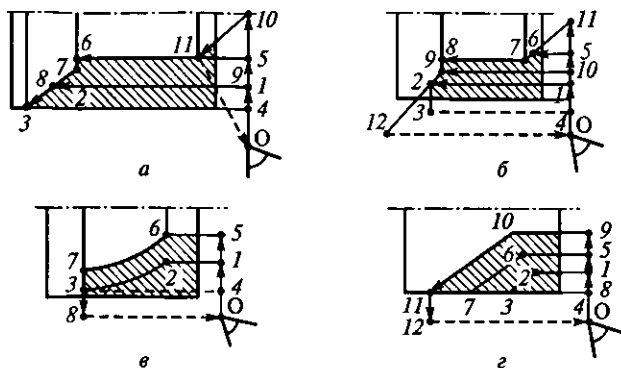


Рис. 4.6. Сложные схемы переходов при обработке полуоткрытых зон:
 а — черновая с подборкой; б — черновая с полуступицистым проходом; в — эквидистантная; г — контурная

мент по программе движется вдоль контура детали, срезая гребешки. Такой полуступицистым проход может быть и окончательным, так как на поверхности не остается рисунок.

6. По «эквидистантной» схеме обработки рабочие ходы инструмента эквидистантны контуру детали (рис. 4.6, в).

7. При «контурной» схеме обработка выполняется последовательными циклами (в виде рабочих и вспомогательных ходов), описывающими контур детали и методично приближающимися к нему (рис. 4.6, г). Контурная схема соответствует стандартному циклу и легко программируется.

Разделение обрабатываемого участка на переходы и выбор траектории инструмента в автоматизированных системах проектирования ТП осуществляется с помощью ЭВМ. Обрабатываемый ступенчатый вал (рис. 4.7, а) имеет линейные размеры l_1, l_2, l_3 и диаметральные — d_1, d_2, d_3 (диаметр заготовки $d_{\text{заг}}$). Зона черновой обработки ограничена прямыми I, II, III и с учетом чистового припуска имеет диаметральные размеры ступеней X_1, X_2, X_3 (рис. 4.7, б).

Чтобы определить число проходов, черновую зону разбивают горизонтальными прямыми — уровнями в таком порядке.

1. Определяют припуски t_1, t_2, t_3 на черновую обработку для каждой цилиндрической ступенчатой поверхности: $t = X_0 - X_1$; $t = X_0 - X_2$; $t = X_0 - X_3$ (рис. 4.7, в).

2. Определяют наименьшее число черновых рабочих ходов для каждой цилиндрической поверхности I, II, III. Для этого делят вычисленные припуски t_1, t_2, t_3 на предельно допустимую глубину резания $t_{\text{пр}}$ и округляют полученное число до большего целого.

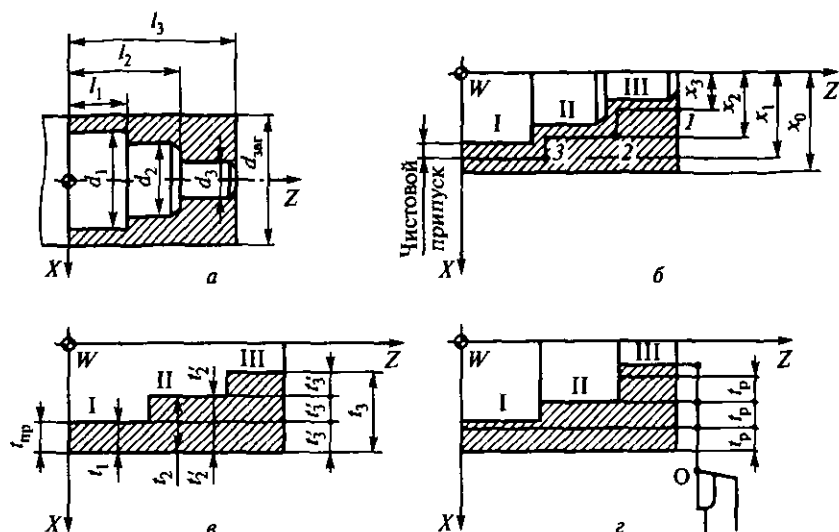


Рис. 4.7. Формирование черновой зоны обработки и разделение припуска на уровни для ступенчатых валов:

a — исходная заготовка; *б* — зоны обработки; *в*, *г* — припуски на черновую обработку

3. Вычисляют глубину резания при черновых проходах в предположении, что припуск на каждую цилиндрическую поверхность разбит равномерно на определенное в предыдущем пункте число проходов. Для первого цилиндра I глубина резания равна t_1 , для второго цилиндра II — t'_2 , для третьего цилиндра III — t'_3 (см. рис. 4.7, *в*).

4. Среди рассчитанных глубин резания устанавливают единую (t_p) для всей черновой зоны (например, $t_p = t'_2$).

5. С учетом численного значения t_p последовательным вычитанием из размера заготовки диаметром $d_{\text{заг}}$ определяют горизонтали (от края к центру) по всему припуску черновой зоны (рис. 4.7, *г*).

Деление припуска с использованием величины t_p является более равномерным по сравнению с делением по предельному значению глубины резания $t_{\text{пр}}$.

При подготовке УП применяют различные схемы удаления припуска.

В схеме по циклам вертикалей припуск удаляют последовательно в каждой области в направлении от края заготовки к центру (рис. 4.8). Сначала удаляется припуск в зоне I (точки 0–10), затем в зоне II (точки 11–16) и в зоне III (точки 17–22).

В схеме по циклам уровней припуск снимают последовательно при продольных перемещениях резца в пределах уровня во всех областях (рис. 4.9). Вначале удаляется верхний слой при движении резца через точки 0,

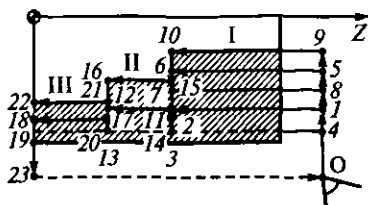


Рис. 4.8. Схема удаления припуска по циклам вертикалей

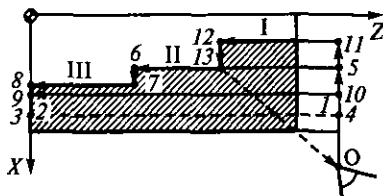


Рис. 4.9. Схема удаления припуска по циклам уровней

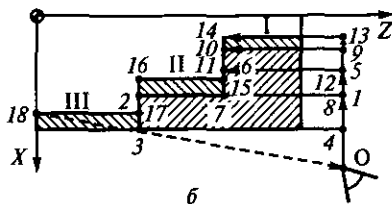
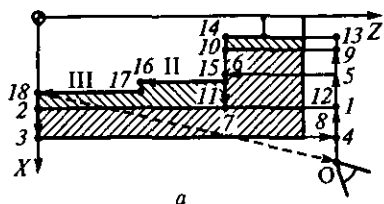


Рис. 4.10. Схема удаления припуска по циклам горизонталей продольным ходом:

a — по всей длине зон; *б* — по уступам

1, 2, отход назад на 0,5 мм в точку 3, ускоренный возврат в точку 4, радиальное смещение (на $t_p + 0,5$ мм) в точку 5. Далее на рабочей подаче удаляется следующий слой при траектории движения резца через точки 5, 6, 7, 8. Затем осуществляется возврат резца в точку 11 на ускоренной подаче и срезается припуск при рабочем ходе резца через точки 12 и 13.

В схеме по циклам горизонталей чернового контура (рис. 4.10, *a*) инструмент сначала удаляет припуск t_p продольным ходом по всем зонам (траектория 0-1-2). Затем такой же припуск удаляется в зоне I за два рабочих хода через точки 5, 6 и 9, 10. Далее следует окончательный (зачистной) рабочий ход по траектории 13-14-15-16-17-18-0.

На рис. 4.10, *б* показан вариант удаления припуска по уступам. В зоне III припуск t меньше t_p . Сначала удаляют последовательно слои металла в зоне I и II, затем выполняют рабочий ход по черновому контуру по траектории 13-14-15-16-17-18-0.

Рассмотренные схемы удаления припуска при обработке ступенчатых валов применимы к различным деталям типа тел вращения: диски, втулки, фланцы, крышки, патрубки и др.

Фрезерные станки. Фрезерование является наиболее универсальным и широко распространенным видом обработки. Фрезерные операции принято классифицировать по числу осей станка с ЧПУ, которые одновременно используются для выполнения конкретной операции. Применяют 2,5-, 3-, 4- и 5- координатную обработку. При 2,5-координатной обработке одновременно автоматически управляются только две

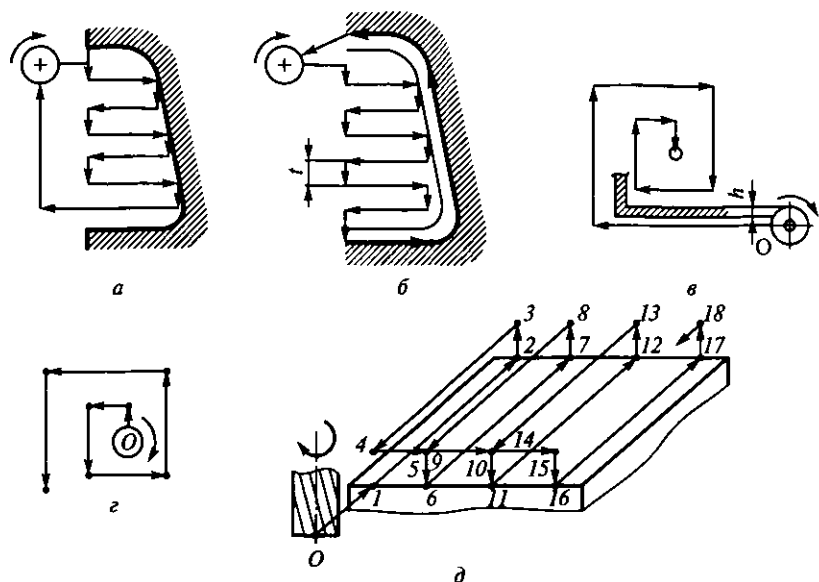


Рис. 4.11. Типовые схемы фрезерования переходов:
а — зигзагообразная; в, з — спиралевидная; д — Ш-образная

координаты (X и Y), третья ось (ось Z) используется только для установочных перемещений (подвод и отвод инструмента). Непосредственно в процессе резания ось Z не управляется (инструмент остается в фиксированном, т. е. заранее установленном в соответствии с требованием УП положении).

На станках с ЧПУ применяют фрезерование цилиндрическое — обработка контуров детали боковой цилиндрической поверхностью инструмента, торцовое — обработка детали торцами режущих инструментов (концевых или торцовых фрез), смешанное фрезерование — одновременная обработка детали боковой и торцовой поверхностями концевых фрез.

При фрезеровании можно выделить области обработки (зоны), которые делят на открытые, полуоткрытые, закрытые и комбинированные. Фрезерные операции на станках с ЧПУ, как правило, состоят из черновых и чистовых переходов. Существует два основных метода формирования траектории фрезы при фрезерной обработке: зигзагообразный и спиралевидный.

Зигзагообразный метод характеризуется тем, что инструмент в процессе обработки совершает движение в противоположных направлениях вдоль параллельных строчек с переходом от одной строки к другой вдоль границы области. Существует несколько разновидностей

зигзагообразных схем обработки контура по ступеням (рис. 4.11, а); с проходом вдоль границ в конце обработки области (рис. 4.11, б).

Спиралевидный метод отличается от зигзагообразного тем, что обработка ведется круговыми движениями инструмента, совершаемыми вдоль внешней границы области на разном расстоянии от нее. Спиралевидная схема выгодно отличается от зигзагообразной более плавным характером обработки. Она обеспечивает неизменное направление фрезерования (по или против подачи) и не дает дополнительных изломов траектории.

Спиралевидная схема имеет две разновидности, одна из которых характеризуется движением инструмента от границы области к центру (рис. 4.11, в), а вторая — от центра области к периферии (рис. 4.11, г).

Обеспечить одинаковый характер фрезерования можно также с помощью схемы Ш-образного типа (рис. 4.11, д). Инструмент после выполнения прохода вдоль строки отводится на небольшое расстояние (0,5...1,0 мм) и на ускоренном ходу возвращается назад. Недостатком схемы является большое число вспомогательных ходов.

При программировании выбирают способ врезания инструмента. Самый простой способ — врезание с подачей вдоль оси инструмента. Использовать этот метод удобнее при предварительной обработке места врезания сверлом (рис. 4.12, а).

Наиболее технологичным способом является врезание при движении инструмента вдоль одной из строк с постепенным его снижением (спуск). Спуск может также осуществляться при движении инструмента по окружности или вдоль границы обрабатываемой области (рис. 4.12, б). В случае чистовой обработки контуров врезания спуск осуществляется по дуге окружности, касательной к контуру в точке, с которой должно быть начато движение инструмента вдоль контура (рис. 4.12, б). Такой метод обеспечивает наиболее плавное изменение сил резания и минимальную погрешность обработки в точке касания.

При построении траектории инструмента для черновых переходов расстояние t между соседними проходами назначают с учетом геометрических параметров применяемого инструмента $t = D - 2r - h$ (см. рис. 4.11, б),

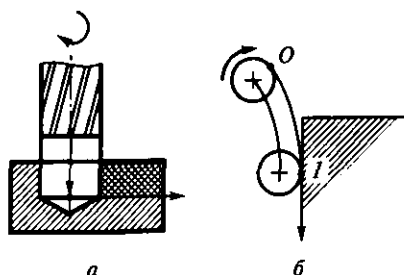


Рис. 4.12. Схема врезания фрезы в металл:
а — с засверливанием; б — по касательной

где D — диаметр фрезы; r — радиус скругления у торца фрезы; h — перекрытие между проходами, обеспечивающее отсутствие гребешков.

Тип фрезы выбирают в зависимости от схемы обработки. Для обработки плоскостей предназначены торцовые фрезы; для контуров — концевые. Основными параметрами фрез являются: наружный диаметр фрезы D ; длина рабочей части l ; число зубьев Z и радиус r .

При обработке торцовой фрезой ребер ее диаметр назначают из условия $D = (5-10) b + 2r$ (b — окончательная толщина стенки ребра; r — радиус скругления у торца инструмента).

Для обеспечения жесткости инструмента желательно, чтобы его диаметр удовлетворял условию $H \leq 2,5D$ (H — максимальная высота стенки обрабатываемой детали).

Длина режущей части инструмента для обработки полуоткрытых и закрытых областей $L = H + (5...7)$ мм, а для обработки наружных и внутренних открытых контуров $L = H + r + 5$.

Многоцелевые станки. На МС можно совмещать различные операции: фрезерование прямолинейных и криволинейных поверхностей, центрования, сверления, рассверливания, цекования, растачивания, нарезания резьбы, круговое фрезерование наружных и внутренних цилиндрических, конических, фасонных поверхностей и круговых пазов концевыми и дисковыми фрезами.

Плоскости фрезеруют торцовыми и концевыми фрезами с твердосплавными многогранными неперетачиваемыми пластинами. Черновое фрезерование при больших припусках целесообразно выполнять торцовыми фрезами. Для чистового перехода используют фрезу, диаметр которой позволяет захватить всю ширину обрабатываемой поверхности.

Обработку открытых плоскостей выполняют концевыми фрезами в том случае, когда они уже используются для обработки других поверхностей (пазов, уступов), чтобы уменьшить номенклатуру применяемых инструментов. Концевыми фрезами, оснащенными твердосплавными сплавами, обрабатывают уступы, пазы, окна.

Для обработки отверстий большого диаметра в корпусных деталях на станках с ЧПУ применяют круговое фрезерование (ранее отверстия обрабатывались только растачиванием). При круговом фрезеровании производительность выше, чем при растачивании. Особенно целесообразно применять круговое фрезерование для предварительной обработки в литых заготовках (для снятия чернового припуска).

Самым распространенным видом технологических переходов на МС являются: сверление, зенкерование, развертывание, нарезание резьбы, растачивание точных посадочных отверстий (гладких и ступенчатых). При обработке отверстий осевым инструментом операции вы-

полняют в таком порядке: сначала обрабатывают все отверстия одним инструментом, а затем другим (при условии, что смена инструмента требует больше времени, чем позиционирование стола). Если требования к точности диаметров и формы отверстий высокие, то их обрабатывают по отдельности со сменой инструментов для каждого отверстия и с перемещением шпинделя только по оси Z . На МС при сверлении кондукторы не используют; на них применяют засверливание отверстий короткими жесткими сверлами (для разметки будущих отверстий).

Для повышения производительности при обработке отверстий на МС широко используют комбинированный инструмент (например, сверло-зенкер и др.). Для получения высокой точности обработку детали выполняют с одного установа. Для деталей с большими припусками предусматривают предварительную обработку поверхностей на универсальных станках.

При выборе плана операций обработки деталей на МС используют типовые схемы обработки, где последовательность переходов операций определена в зависимости от типа детали и заготовки, вида обрабатываемых поверхностей, требований точности и др.

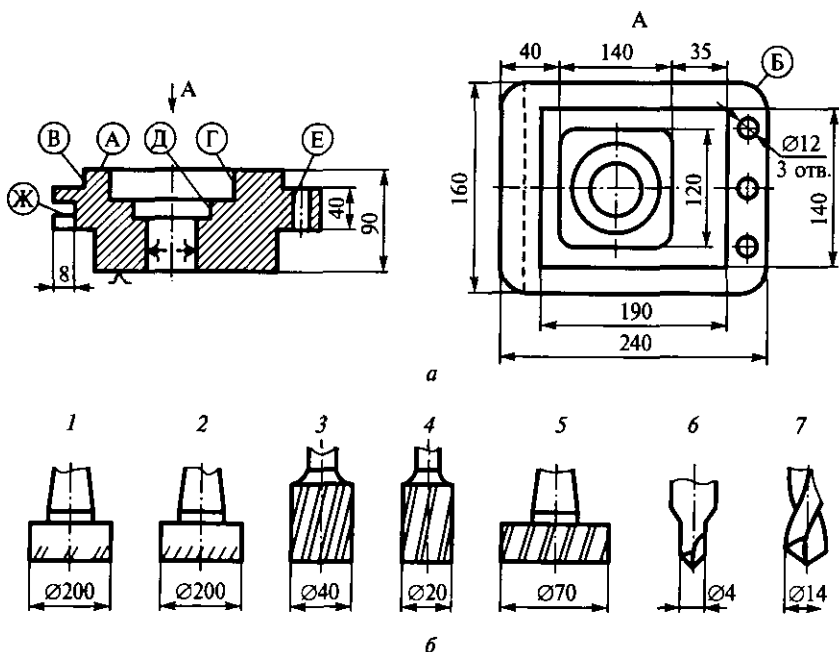


Рис. 4.13. Схема обработки детали типа «корпус»: а — обрабатываемая деталь; б — применяемый инструмент

Пример. Содержание и последовательность переходов при обработке на МС детали типа корпус (рис. 4.13):

- 1) черновое фрезерование верхней плоскости (зона А); фреза торцовая 1 — с СМП диаметром 200 мм;
- 2) чистовое фрезерование зоны А: фреза торцовая 2 — с СМП и подчистным ножом диаметром 200 мм;
- 3) фрезерование наружного контура 160×240 мм (зона Б); фреза концевая диаметром 40 мм быстрорежущая;
- 4) фрезерование наружного контура (квадрата 140×140 мм — зона В); фреза концевая диаметром 40 мм быстрорежущая;
- 5) черновое фрезерование выемки 120×120 мм по контуру (зона Г); фреза концевая 3 твердосплавная диаметром 40 мм;
- 6) чистовое фрезерование зоны Г; фреза концевая 4 — быстрорежущая диаметром 20 мм;
- 7) черновое фрезерование внутреннего контура окружности (зона Д); фреза концевая 4 — быстрорежущая диаметром 20 мм;
- 8) фрезерование продольного паза (зона Ж); фреза дисковая 5 — пазовая с твердосплавными вставными ножами диаметром 70 мм;
- 9) центрование двух отверстий диаметром 12 мм (зона Е); сверло 6 — центровочное быстрорежущее диаметром 4 мм;
- 10) сверление двух отверстий диаметром 12 мм (зона Е); сверло спиральное 7 — быстрорежущее диаметром 12 мм.

4.3. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ

Последовательность этапов автоматизации

Управляющая программа (УП) — совокупность команд на языке программирования, соответствующая алгоритму функционирования станка при обработке заготовок.

Технологический процесс изготовления деталей на станках с ЧПУ связан с получением, обработкой, передачей, хранением и управлением огромными информационными потоками. При этом важную роль играет человек (разработка ТП, работа в режиме диалога с ЭВМ, подготовка и отладка УП, активное участие в организации и управлении процессом обработки). Поэтому с позиции кибернетики комплекс систем проектирования ТП (САПР), подготовки УП (система автоматического программирования — САП) и управления процессом обработки (СЧПУ) можно рассматривать как человеко-машинную систему, где человек использует уникальные возможности электронной техники (рис. 4.14):

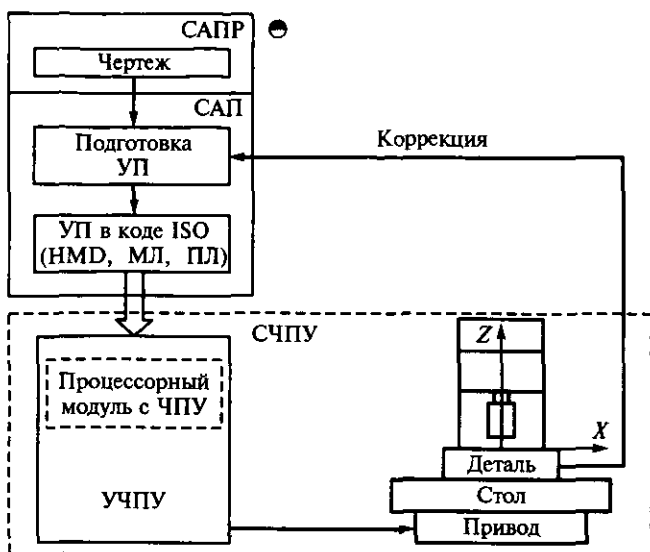


Рис. 4.14. Обобщенная структура и связь САПР, САП и СЧПУ при изготовлении деталей в условиях ГАП

- возможность комплексной автоматизации всего процесса изготовления деталей за счет широких технологических возможностей автоматического программно-управляемого оборудования;
- возможность автоматизации процесса проектирования ТП и подготовки УП с использованием САПР и САП (см. рис. 4.14).
- возможность обеспечить автоматическое управление станками.

При разработке ТП и подготовке УП большой объем информации перерабатывается в определенной последовательности:

1. Разработка маршрутной технологии — определение состава и последовательности операций.
2. Разработка операционной технологии с расчетом режимов резания.
3. Расчет траектории движения режущих инструментов — расчет координат опорных точек.
4. Формирование команд и функций, кодирование информации.
5. Запись УП на программноноситель.
6. Проверка и отладка УП (внесение коррекции).

Программирование ТП изготовления деталей на станках с ЧПУ — качественно новый этап, когда выполняется часть работы (этапы 3–6), перенесенная из сферы производства в область технологической под-

готовки. Действия рабочего при обработке заготовок на обычном станке (после этапов 1–2) выполняются на станке с ЧПУ в автоматическом режиме по УП. Под обработкой понимается заданное изменение формы, размеров или шероховатости поверхности заготовок.

Технологический процесс обработки на станках с ЧПУ требует большой детализации — разбиения на элементы, т. е. декомпозиции. Структурно ТП делится на операции, установы, позиции, переходы, рабочие и вспомогательные ходы, шаги и технологические команды. Последовательность элементарных перемещений и технологических команд определяет содержание УП.

При разработке маршрутной технологии определяют состав операций, целесообразность выполнения которых на станках с ЧПУ устанавливают на основе технико-экономических расчетов.

Подготовка УП требует переработки большого объема специальной информации. Применение ЭВМ для автоматизации программирования и подготовки УП потребовало разработки специального программно-математического обеспечения для решения различных технологических и геометрических задач, встречающихся при подготовке УП.

Совокупность математического, программного обеспечения и проблемно-ориентированного языка для записи и ввода в ЭВМ исходной информации при подготовке УП называют САП. В настоящее время разработано множество различных САП. Они различаются степенью и уровнем автоматизации этапов подготовки УП.

Чертеж изготавливаемой детали представляют в виде технической документации (на электронных или магнитных носителях), полученной от САПР (см. рис. 4.14). Визуальный контроль такого чертежа возможен с помощью дисплея ЭВМ. Если чертеж представлен в традиционном виде, то данные чертежа вводятся в САП с помощью клавиатуры. САП перерабатывает данные чертежа и выдает УП в коде ISO (стандарт ISO6983).

Полученная от САП УП обычно фиксируется на накопителе на магнитном диске (НМД — гибкая дискета или жесткий диск). Применяют также накопители на магнитной ленте (МЛ) или перфоленте (ПЛ).

Ввод УП производится либо путем установки в дисковод устройства ЧПУ (УЧПУ) станка, либо пересылки УП из САП (жесткого диска) в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) процессорного модуля УЧПУ.

Процессорный модуль формирует сигналы управления, которые подаются на автоматический привод. При одновременном управлении движением по двум координатам можно обрабатывать конические и криволинейные поверхности.

САП можно рассматривать как кибернетическую систему, обеспечивающую переработку информации. На вход системы поступает информация об обрабатываемой детали и указания проектировщика, а на выходе получаем подготовленную УП. Обычно УП в САП формируется в два этапа.

Основные блоки САП: сервис, препроцессор, процессор, постпроцессор. Блок сервис перерабатывает постоянную информацию о станках, инструментах, материале заготовок и др. Информация систематизируется и записывается в долговременную память ЭВМ в виде таблиц параметров.

На первом этапе переработка информации осуществляется в двух блоках, составляющих основу каждой САП, — процессоре и постпроцессоре. Процессор выполняет комплекс геометрических и технологических расчетов «без привязки» к конкретному станку и системе ЧПУ. Процессор рассчитывает траекторию движения инструмента. Эти данные вместе с данными о режимах резания выводятся на внешний носитель ЭВМ — диск или магнитную ленту. Форма представления этих данных носит название CLDATA (от англ. CATER Location Data — данные о положении инструмента) и представляет собой особый вид промежуточной информации «процессор — постпроцессор» на определенном промежуточном языке.

Процессор САП состоит из трех последовательно работающих блоков: трансляции, геометрического, формирования CLDATA.

Блок трансляции (препроцессор или блок ввода и декодирования) выполняет следующие функции: считывание исходной программы обработки детали с внешнего носителя; вывод введенной программы на печать или экран дисплея; преобразование информации из символьной формы во внутримашинное представление. В препроцессоре готовятся данные для работы других блоков, операции разделяются на установки и позиции, выбираются схемы крепления заготовки и комплектуются инструментальные наладки.

Геометрический блок процессора решает задачи, связанные с построением траектории движения инструмента: нахождение точек и линий пересечения различных геометрических элементов; аппроксимация различных кривых с заданным допуском; диагностика геометрических ошибок; построение эквидистантного контура с учетом радиуса инструмента.

Технологический блок автоматически делит область, подлежащую обработке, на ряд переходов, рабочих ходов и рассчитывает оптимальные режимы резания.

Блок формирования CLDATA подготавливает информацию для работы постпроцессора. Данные CLDATA с внешнего носителя ЭВМ считываются постпроцессором. Постпроцессор продолжает переработку промежуточной информации процессора и формирует УП с ориентацией (т. е. с «привязкой») на конкретный станок и систему ЧПУ. Типовые функции постпроцессора: считывание данных, подготовленных процессором, и перевод их в систему координат станка; формирование команд на перемещение с учетом цены импульса СЧПУ и команд, обеспечивающих цикл смены инструмента; кодирование и выдача в кадр значений подач и скоростей шпинделя; выдача команд на включение охлаждения, зажима — разжима заготовок; выдача управляющей перфоленты и листинг (распечатки) УП; диагностика ошибок; выполнение сервисных функций. Это второй этап переработки информации. Обычно САП содержит набор постпроцессоров, которые обеспечивают формирование УП для конкретных типов станков с ЧПУ. Вызов необходимого постпроцессора осуществляется автоматически по указанию, данному технологом-программистом в тексте исходной программы.

Двухэтапная организация работы САП при подготовке УП имеет важное преимущество. На одном конкретном языке САП на базе одной и той же исходной информации, имея данные CLDATA и используя различные постпроцессоры, можно получать УП для различных моделей станков и УЧПУ. Кроме того, для включения новых моделей станков с ЧПУ к существующей на предприятии САП достаточно разработать постпроцессор и состыковать с САП. Совместно с постпроцессором организуется работа с программным блоком «редактор», позволяющим редактировать УП, выведенную на экран дисплея.

Пример. Рассмотрим обработку детали «плита» на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ модели 6Р13РФ3 с устройством ЧПУ модели Н33. Программа на языке САП ТЕХТРАН. Обработка по контуру концевой фрезой диаметром 20 мм (рис. 4.15)

1. ДЕТАЛЬ ПЛИТА
2. ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ
3. СТАНОК 6Р13РФ3
4. МЕТОД ЛИНКРУГ
5. ЧЕРТЕЖ ВКЛ, ХУПЛ
6. ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛИ
7. ТЧИ = -20, -30, 40
8. ТЧ0 = 0,0
9. ТЧ1 = -20, -10
10. ТЧ2 = 0,50
11. ПР1 = ТЧ0, УГОЛ, 90

12. ПР2 = ТЧ2, УГОЛ, 45
13. ПР3 = ПАРЛЕЛ, ПРБ, 70, УБ
14. ПР4 = ПАРЛЕЛ, ПРБ, 32, УБ
15. ПР5 = ПАРЛЕЛ, ПР1, 165, ХБ
16. ПР6 = ТЧ0, УГОЛ, 0
17. КР1 = 55, 32, 33
18. КР2 = УБ, ПР4, ХБ, ВНЕ, КР1, РАДИУС, 43
19. КОНТУР КОН1 = ИЗТЧ0, ХБ, ВПЕРЕД ПР6, ВЛЕВО ПР5, ВЛЕВО ПР4, КАС КР2, ВПЕРЕД КР2 КАС КР1, ВПЕРЕД КР1 ДО ПЕРЕСЕЧ ПР3, ВПЕРЕД ПР3, ПР2, ВПЕРЕД ПР1 ЗА ПР6, КОНКОН.
20. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ
21. ИЗ ТЧИ
22. ИНСТР 20
23. БЫСТРО
24. НАПРТ ТЧ1
25. ИДИ ЗА ПР6
26. ШПИНДЛ 600 ПО ЧС
27. КОРРЕК СПРАВА, РАДИУС, 10
28. ПОДАЧА ММИН 300
29. ПРИРАЩ – 45
30. ПОДАЧА ММИН 110
31. ИНСТР СПРАВА
32. ХБ ПО КОН1
33. КОРРЕК ВЫКЛ, РАДИУС, 10
34. ШПИНДЛ ВЫКЛ
35. БЫСТРО
36. ПРИРАЩ 45
37. В ТОЧКУ ТЧИ
38. КОНЕЦ

Комментарии к программе

Строки 1–3 — исходные данные. Числом 301 обозначен постпроцессор УЧПУ модели НЗ3 используемого станка с ЧПУ.

Строка 4 — указан метод линейно-круговой интерполяции.

Строка 5 — указана плоскость.

Строки 7–10 — в системе координат детали заданы точки контура детали координатами X и Y . За начало координат детали принята точка ТЧ0.

Строки 11–16 — заданы прямые контура детали. Прямые ПР1, ПР2, ПР6 заданы как параллельные соответствующим прямым на заданном расстоянии. Прямая ПР6 совпадает с осью X , а при ПР1 — с осью Y .

Строка 17 — дуга КР1 задана координатами центра (55,32 мм) и радиусом $R = 33$ мм.

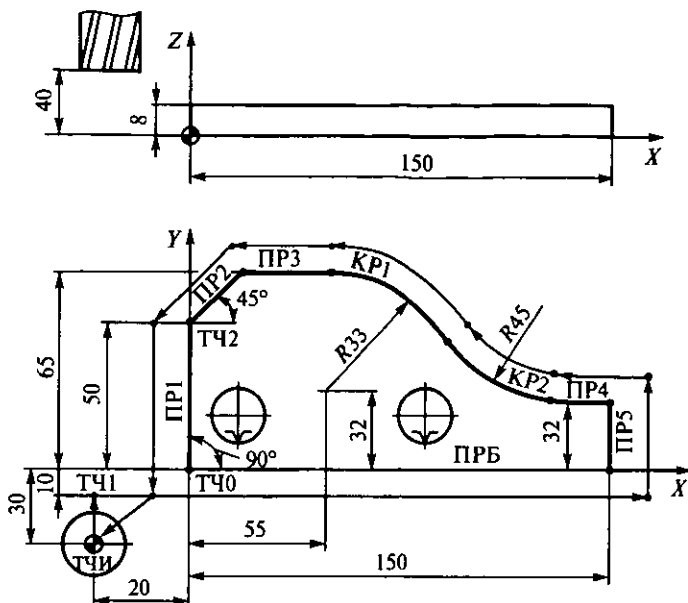


Рис. 4.15. Расчетно-технологическая карта для программирования обработки детали «плита» в САП ТЕХТРАН

Строка 18 — дуга КР2 задана сопряженной с прямой ПР4 (выше прямой УБ), справа от дуги КР1 (ХБ) и вне этой дуги.

Строка 19 — описывается контур, определенный как КОН1. Описание контура начинается в точке ТЧ0 вдоль оси Х (ХБ), по ПР6 и далее влево ПР5 и ПР4. Далее указывается ВПЕРЕД КР2 КАС КР1. Происходит касание двух кривых (КР2 и КР1). В случае касания элементов должен быть указан оператор ВПЕРЕД, хотя угол в точке перехода прямой ПР4 в дугу КР равен нулю, т. е. направление ПР4 неизменно. Операторами ВПЕРЕД КР1 ДОПР2 ПЕРЕСЕЧ ПР3 указывается вторая возможная точка пересечения ПР3 и КР1. Завершается контур за прямой ПР6.

Строка 22 — указан диаметр фрезы, равный 20 мм.

Строка 23 — ускоренный ход.

Строки 24, 25 — указано направление перемещения центра инструмента (на точку ТЧ1) из исходной точки вдоль оси Z. Торцев фрезы опускается ниже оси Х на 5 мм (за ПР6).

Строка 26 — задана частота вращения шпинделя 600 об/мин, вращение по часовой стрелке. По той же команде может быть включено вращение шпинделя.

Строка 27 — указано расположение инструмента относительно контура для расчета эквидистанты.

Строка 28 — задана подача инструмента по оси Z.

Строка 29 — указано перемещение инструмента по оси Z на величину 45 мм.

Строка 30 — задана подача для работы по контуру.

Строка 31 — указано положение инструмента относительно направления последующего его перемещения.

Строка 32 — задано перемещение инструмента по ранее определенному контуру. Модификатор ХБ указывает направление начала обхода контура КОН1.

Строка 33 — отключение коррекции, ранее введенной в п. 27.

Строка 34 — выключение шпинделя.

Строка 35 — быстрый ход.

Строка 36 — подъем инструмента (по оси Z).

Строка 37 — перемещение инструмента в исходную точку.

Пример обработки детали «плита» на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ модели 6P13PФЗ с устройством ЧПУ модели НЗЗ. Программа на языке САП — ЕС. Обработка по контуру концевой фрезой диаметром 20 мм (рис. 4.16).

ПРОГРАММА = 001

СТАНОК = 6P13PФЗ, 301

ДЕТАЛЬ ПЛИТА

НТК = -20, -30, 80;

ИН01 = 0001, 0, 0, 50, 10;

ТК0 = 0, 0;

ТК1 = -20, -30;

ТК2 = -20, -10;

ТК3 = 0, 50;

ПР1 = X/0;

ПР2 = ТК3, Б/450000;

ПР3 = Y/65;

ПР4 = Y/32;

ПР5 = X/150;

ПР6 = Y/0;

КР1 = X/55, Y/32, R/35;

КР2 = БХ+КР1, БУПР4, R45;

НПО; S/300; N/-600; ОТТК1; X/ ; Y/20; Z/-35; S/110; +НК01; ФР+; P/10; ПОПРБ; ПОПР5; ПО-КР2; ПО+КР1; МХТК; ПОПР3; ПОПР2; ПОПР1; ДОТК2; КК01; ФРО; S/300; Z/35; X/-10; Y/-20; КПО!

Комментарии к программе

Исходное положение торца шпинделя (точка N) относительно системы координат детали XOZ определяет оператор НТК (координаты точки N перед обработкой: $X = -20$; $Y = -30$; $Z = 80$).

Оператор ИН определяет положение инструмента (номер 01) относительно центра торца шпинделя: 0001 — код инструмента; 0, 0, 50 — численные значения вылета инструмента по осям X , Y , Z ; 10 — радиус фрезы, мм. Затем в программе выполняется расчет геометрических параметров обрабатываемого контура (точек, прямых, окружностей), после чего идет описание процесса обработки.

Оператор НПО — начало процедуры О (первая процедура в процессе обработки); S/300 — подача 300 мм/мин; N/-600 — обороты шпинделя в минуту. Знак минус означает, что вращение по часовой стрелке. От точки ТК1 рассчитывается смещение инструмента по соответствующим осям (в приращениях). Оператор +НКО1 — начало коррекции на инструмент 01. Оператор (ФР+) — начало автоматического расчета эквидистанты справа от контура (поэтому знак плюс). Запись P/10 —

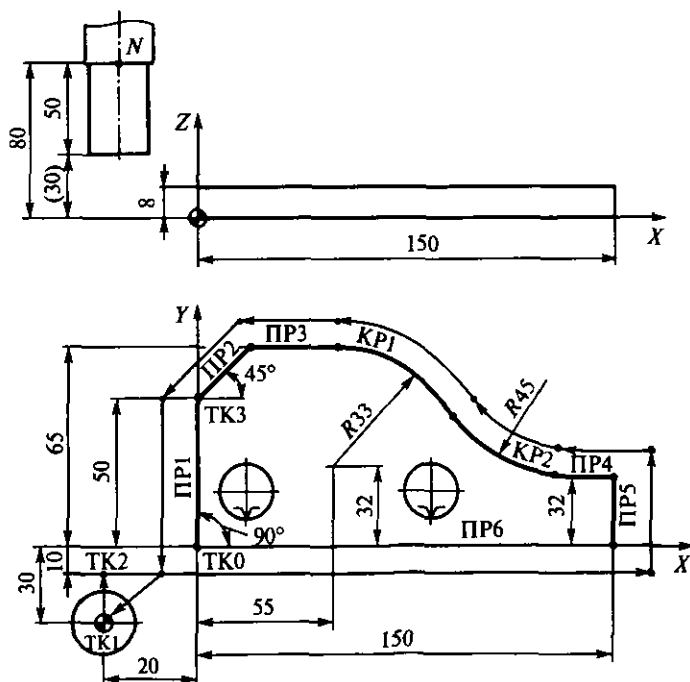


Рис. 4.16. Расчетно-технологическая карта для программирования обработки детали «плита» в САП-ЕС

означает расстояние от центра фрезы до обрабатываемого контура, в рассматриваемом случае равно радиусу фрезы. Перемещение фрезы по контуру производится на рабочей подаче (S/110) — вдоль прямых ПРЗ, ПР2, ПР1 до точки ТК2, где кончается коррекция инструмента (КК01), после чего отменяется автоматический расчет эквидистанты, т. е. осуществляется сход на контур (ФРО). Из точки ТК2 на быстром ходу с одновременным поднятием фрезы по оси Z ее центр выводится в исходное положение — точку ТК1.

Фреза обходит дугу окружности КР2 по часовой стрелке (–КР2), а дугу КР1 — против часовой стрелки (+КР1). При обходе окружности КР1 до прямой ПРЗ возможно двойственное решение, поэтому указываются только меньшее значение «х» точки пересечения этих элементов контура (МХТК). Конец процедуры О обозначают символом КПО. Знак «!» означает завершение программы.

Пример. Рассмотрим обработку детали на токарном станке с ЧПУ модели Н221. Программа на языке САП ЕХАРТ-2. Контурная обработка резцом (рис. 4.17).

Исходные данные:

1 PARTCO/WALSE

2 MACHIN/16K20F3 — Н221

3 PART/MATERL, 4

Комментарии и пояснения к исходным данным

Строка 1 — указан номер детали/вал.

Строка 2 — указаны модели станка и УЧПУ — станок/16К20Ф3 Н221.

Строка 3 — указаны — деталь/материал, код 4.

Описание контура заготовки:

4 CONTUR/BLANCO

5 BEGIN/O, O, XLARGE, ПЛАН, О

6 RGT/DIA, 70

7 RGT/ПЛАН, 200

8 TERMCO

Комментарии и пояснения к описанию контура заготовки

Строка 4 — Контур/контур заготовки.

Строка 5 — Начало X=0, Z=0, X больше. Вертикаль, Z=0.

Строка 6 — Вправо/диаметр 70.

Строка 7 — Вправо/вертикаль, Z=200мм.

Строка 8 — Вправо/диаметр, 0 (это фиктивный участок, замыкающий контур).

Строка 9 — Конец контура.

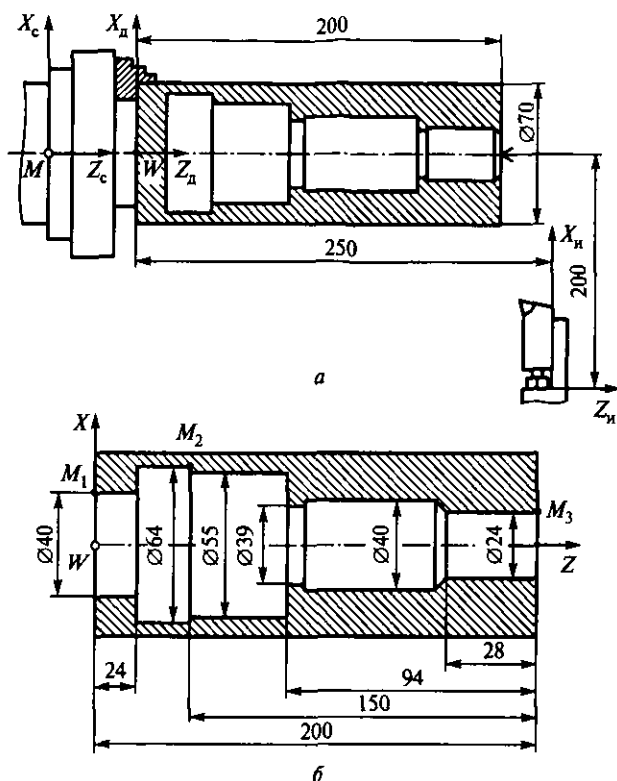


Рис. 4.17. Программирование токарной операции изготовления детали «вал» на языке САП EXAPT-2:

a — схема для программирования обработки; *б* — обозначения геометрических элементов

Описание контура детали:

- 10 CONTUR/PARTCO
- 11 BEGIN/O, O, XLARGE, O, LEVEL, 2
- 12 M1, RGT/DIA, 40
- 13 LFT/ПЛАН, 24
- 14 RGT/DIA, 64
- 15 M2, RGT/ПЛАН
- 16 LFT/DIA, 55, LEVEL, 1
- 17 RGT/ПЛАН, (200-94)
- 18 LFT/DIA, 40, LEVEL, 1
- 19 RGT/ПЛАН, (200-28)
- 20 LFT/DIA, 24, LEVEL, 1
- 21 M3, RGT/ПЛАН, 200

22 RGT/DIA, 0

23 TERMCO

Комментарии и пояснения к описанию контура детали

В строках 12–23 записаны фразы начала и конца описания контура. В строках 11–22 даны геометрические определения элементов контура детали. Маркеры M_1 , M_2 и M_3 используются для последующих ссылок на ограниченные ими участки контура в инструкциях по выполнению технологических указаний.

Далее в программе задаются:

Безопасное расстояние

24 CLDIST/2,

на которое не доходит инструмент при быстром подводе в зону резания.

Безопасная позиция

25 SAFROS/200,250,

в которой осуществляется смена инструмента.

Припуск на обработку

26 OYSIZE/FIN, 0,6,

определяющий границу зоны черновой обработки.

Расположение заготовки при ее закреплении в первом установе

27 CLAMP/O,

устанавливающее связь между системами координат детали и станка.

Технологические указания:

28 A1=TURN/SO, LONL, TOOL, 1, 1, OSETNO, 1, SETANG, 90, ROUGH

29 A2=CONT/SO, TOOL, 2, 2, OSETNO, 2, SETANG, 90, FIN,

означают:

строка 28—A = Точение/Одиночная операция, направление подачи параллельно оси вращения, инструмент номер 1 установлен в первой (1) позиции резцедержателя, корректор номер 1, угол установки резца 90°, черновая обработка;

строка 29—A2 = Проход вдоль контура/Одиночная операция, инструмент номер 2 установлен во второй позиции резцедержателя, корректор номер 2, угол установки резца 90°, получистовая обработка.

Технологические указания выполняются согласно инструкции:

30 GUTLOG/BEVORE

31 COOLNT/ON

32 WORK/A1, A2

33 GUT/M2, TO, M3

Строка 30 — Расположение инструмента/Перед осью вращения (эта фраза определяет квадрат обработки).

Строка 31 — Охлаждение/Включить.

Строка 32 — Вызов операций/A1 и A2.

Строка 33 — Обработать/участок контура от M2 до M3.

4.4. Моделирование процесса обработки поверхностей деталей в интерактивном режиме

При подготовке УП с применением САП часто используют режим «диалога» технолога-проектировщика с ЭВМ (интерактивный режим). При подготовке УП технолог строит на экране контур детали, исправляя все допущенные ошибки. Задавая технологические инструкции, он получает график рассчитанной на ЭВМ траектории инструмента, визуально контролирует расчет и вносит коррективы. При моделировании процесса обработки в режиме «диалога» (например, используя программу системы автоматизации программирования T — FLEX NC Tracer 3D) проектировщик отслеживает на экране дисплея по шагам результаты своих действий (процедур): проектирование заготовки; проектирование (выбор) режущего инструмента; расчет траектории инструмента; моделирование процесса резания (например, движение фрезы по рассчитанной траектории); визуализация процесса резания на экране дисплея; внесение корректив; получение листинга (распечатки УП); окончательный (точный) контроль качества УП и редактирование (рис. 4.18). Программа Tracer предназначена для разработки, редактирования и отладки УП и позволяет автоматизировать (на разных уровнях) процесс подготовки УП.

Управляющая программа содержит информацию о геометрических параметрах изготавливаемой детали и технологических командах. При подготовке УП применяют единую систему терминов и обозначений (коды, символы, команды, описания), которые регламентированы рядом документов (стандарт ISO 6983, ГОСТ 20999). Программирование любого движения осуществляется в стандартной системе координат, рекомендуемой ISO. Координатные оси рабочих органов, несущих заготовку (или инструмент), обозначают по правилу «правой руки» (рис. 4.19). Ось Z совмещена с осью шпинделя (ось главного движения у всех типов станков). Ось X всегда горизонтальна. За положительное направление вращения A, B, C вокруг осей X, Y, Z принято вращение по часовой стрелке при взгляде вдоль положительного направления оси.

При программировании и наладке станка для работы по УП используют некоторые характерные точки: нулевую, исходную, фиксированную (ГОСТ 20525).

Положение координатной системы станка определяется нулевой точкой M — нуль станка. Нулевая точка детали D служит началом от-

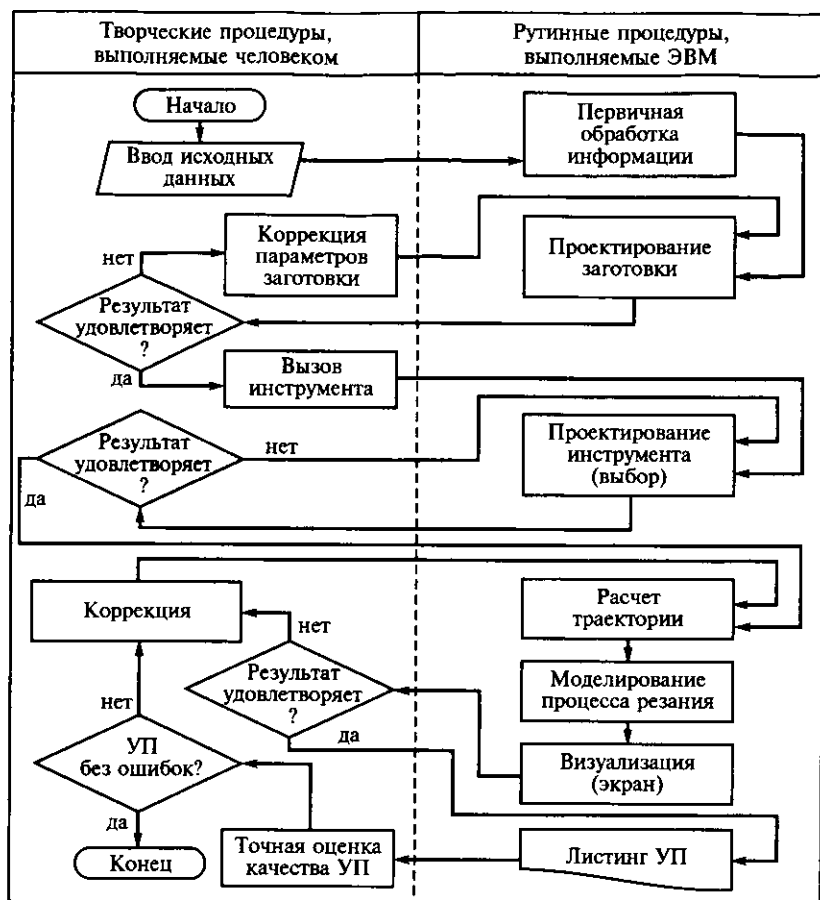


Рис. 4.18. Распределение функций между человеком и машиной при подготовке УП в режиме диалога с использованием САП при моделировании процесса обработки заготовок

счета ее координатной системы. Точка N — нулевая точка инструмента, относительно которой инструмент выставляется на требуемый размер (вылет инструмента учитывается при программировании).

Исходная точка (НТ) — точка, определенная относительно нулевой точки станка и используемая для начала работы по УП (точка R).

Исходной информацией для кодирования и записи УП является ТП обработки на станке с ЧПУ, представленный в виде элементарных перемещений и технологических команд.

При программировании принято считать обрабатываемую заготовку условно неподвижной, а инструмент — перемещающимся относи-

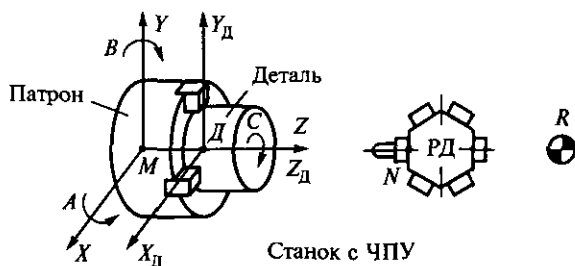


Рис. 4.19. Система координат и характерные точки станка с ЧПУ:

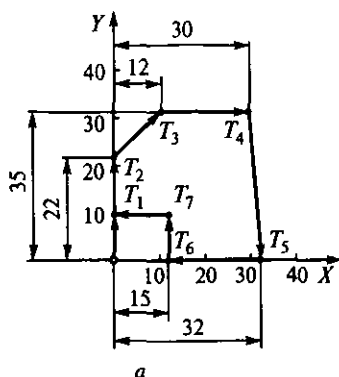
РД — резцедержка

тельно нее в пределах координатной системы. Управляющая программа записывается в системе координат, непосредственно связанной с обрабатываемой заготовкой (координатная система детали $X_d Y_d Z_d$). Началом отсчета этой системы является нуль детали Д. Координатная система детали $X_d Y_d Z_d$ определенным образом располагается относительно координатной системы станка $X Y Z$ (см. рис. 4.19). В качестве координатной системы детали можно использовать координатную систему ее технологических баз или другую систему координат, построенную на плоскостях симметрии детали или на пересечении ее сторон.

При подготовке УП размеры детали можно задавать в абсолютных значениях (т. е. в координатах) или же в приращениях. Для задания размеров в абсолютных значениях используют координатный метод простановки размеров на чертеже детали. Размерные линии располагают параллельно координатным осям и все размеры проставляют от нулевой точки координатной системы детали — нуля детали (рис. 4.20).

При задании размеров в приращениях целесообразна простановка размеров на чертеже по цепному методу, когда каждый задаваемый размер исходит из ранее образмеренной точки. Есть системы управления, которые позволяют реализовать обработку при программировании как в координатах, так и в приращениях. Программирование в координатных предпочтительнее, так как ошибка в одном размере (в одной точке) не влияет на остальные размеры; обеспечивается наглядность при программировании.

При подготовке УП следует задавать средние размеры детали, так как отклонения, возникающие в процессе обработки, с равной вероятностью могут быть направлены как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения размера.



Точка	Координата	
	X	Y
T ₁	0	10
T ₂	0	22
T ₃	12	35
T ₄	30	35
T ₅	32	0
T ₆	15	0
T ₇	15	10

Рис. 4.20. Задание размеров детали в абсолютных значениях (в координатах):
 а — простановка размеров координатным методом; б — значение координат программируемых точек $T_1 - T_7$

Управляющая программа записывается на программоноситель в виде последовательности кадров. Кадр (блок информации) представляет собой геометрическую, технологическую и вспомогательную информацию, записанную в коде ISO (для одной операции), например:

% 0				ПС
(комментарии)				ПС
:				ПС
N 10. . .				ПС
N . . .	MO2			ПС
% 1	.	.	.	ПС
N	.	MO2	MO3	ПС

Установлена жесткая структура и последовательность кадров при разработке УП. Программа начинается с заголовка % 0. Возможны также заголовки % 1...% 9. После двоеточия в заголовке описывается формат кадра. Заголовок, как и каждый кадр программы, заканчивается знаком ПС. После заголовка пишут комментарии (в скобках). Комментарии при выполнении программы не учитываются.

Несколько кадров объединяются в главы УП. Каждая глава начинается с главного кадра (ГК), который начинается с двоеточия [:] и номера не имеет. Главный кадр содержит информацию об общих условиях, действующих в течение всего цикла обработки.

Кадры состоят из слов, которые записываются в виде символов. Первый символ слова обозначают буквой, указывающей тип слова. Ос-

тальные символы образуют число со знаком или целочисленный код. Каждый кадр должен содержать: символ N с группой цифр (номер кадра); информационные слова; символ ПС. Информационные слова записываются в каждом кадре в установленном порядке, в зависимости от типа слова, указанного латинской буквой:

N — «Число повторений участка программы».

G — «Подготовительная функция».

D — «Функция коррекции».

X, Y, Z, U, W, P, Q, I, J, K, A, C, R — «Размерные перемещения».

F — «Функция подачи».

S — «Скорость вращения шпинделя».

T — «Функция инструмента».

M — «Вспомогательная функция».

L — «Подпрограмма».

R — «Параметр».

Формат кадра записывается в заголовке:

% 1: N04 G02 D1 X033 Y033 ПС
I033 J033 F03 S04 T02 M02 M03 ПС

Кадры следуют в порядке возрастания номеров. Номера можно давать через интервал, чтобы был резерв для включения кадра при изменении (или коррекции) УП. Номера кадров не должны повторяться в пределах одной программы.

Для каждого типа слова в формате записывается буквенный символ данного слова и группа цифр. Если в формате кадра первая цифра «ноль», то при записи слов данного типа в УП можно отбрасывать все нули, стоящие перед первой значащей цифрой.

Вторая цифра формата задает максимальное количество цифр в слове заданного типа. Например, формат N 04 означает, что при задании номеров кадров можно отбрасывать все нули, стоящие перед первой значащей цифрой, а количество цифр в номере кадра не должно превышать четырех.

При форматировании координат задаются две значащие цифры помимо начального нуля. Первая цифра определяет количество разрядов целой части величины координаты, задаваемой в УП, а вторая — количество разрядов дробной части. Так, координата X + 002145 может быть записана в УП также и в виде X + 2145 и означает, что X = + 2,145 мм. А запись X-2145 означает, что X = - 214,5.

G02 — означает возможность использования до 100 вспомогательных команд;

D1 — означает, что можно вводить до 10 коррекций, от D0 до D9;

F03 — задание минутной подачи в пределах 0 ... 999 мм/мин;

S04 — задание частоты вращения шпинделя в пределах 0 ... 9999 об/мин;
 T02 — функция инструмента (до 100);
 M02 — означает возможность задания ста вспомогательных функций;
 M30 — конец программы;
 ПС — конец кадра.

Вспомогательные функции M кодируются двузначным числом от M00 до M99. Подготовительные команды от G00 до G99 определяют в целом режим работы системы (характер позиционирования), выбор постоянных циклов, системы отсчета и др.

Использование САП позволяет моделировать на ЭВМ в интерактивном режиме уже на стадии подготовки УП ТП изготовления деталей (рис. 4.21). Проектировщик в режиме диалога вводит в ЭВМ необходимую геометрическую и технологическую информацию. В нашем примере используются следующие исходные данные: заготовка — лист толщиной 5 мм (припуск на сторону по 2 мм), $L_1 = L_2 = 100$, $L_3 = 10$ и $R_1 = 20$ мм; фреза концевая $\varnothing 20$ мм; $S_{мп} = 600$ об/мин; подача F_2 , мм/мин.

Размеры детали заданы в абсолютных координатах, система координат — правая, оси координат: Z — вертикальная (главное движение); X и Y — горизонтальные.

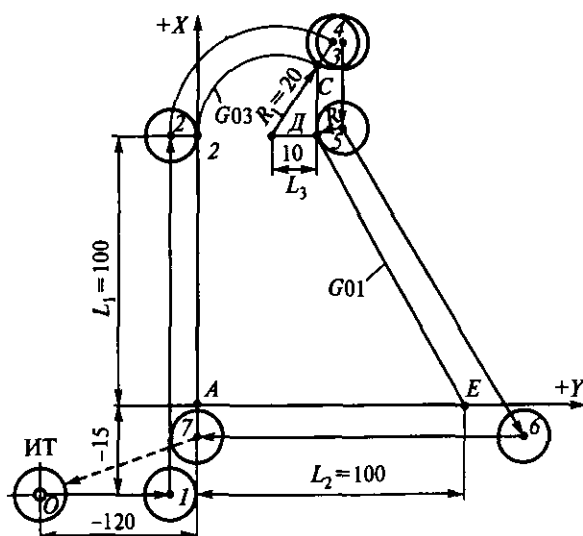


Рис. 4.21. Схема обработки заготовки на фрезерном станке с ЧПУ:

А, В, С, Д, Е — граничные точки контура детали (по чертежу);
 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — опорные (рассчитанные) точки эквидистанты

Фреза из точки О на ускоренной подаче $F_{уп} = 200$ мм/мин подается в точку 1 с координатами $X = 15.000$ и $Y = 10.000$. Величина $Y = 10.000$ (т. е. $Y = 10$ мм) есть результат коррекции, т. е. сдвига эквидистанты (центра фрезы $\varnothing 20$ мм) на величину ее радиуса 10 мм. Величина $X = 15.000$ (т. е. $X = 15$ мм) складывается из трех составляющих: 2 мм — припуск на сторону заготовки; 3 мм — зазор «безопасности» (защита фрезы от удара в заготовку при ее подходе в точку 1 на ускоренной подаче); 10 мм — радиус фрезы.

На участке 1–2 обрабатываются участок детали А–Б на рабочей подаче $F_{рп} = 100$ мм/мин. На участке 2–3 осуществляется круговая интерполяция (G03 — интерполяция «против часовой стрелки»). Обработка участка Б–С заканчивается в точке С, которой соответствует координата центра фрезы в точке 3. Для обработки участка С–Д (без «подреза») центр фрезы надо сдвинуть из точки 3 в точку 5 на 5 мм. Аналогично определяются координаты остальных точек (5, 6, 7). Из точки 7 фреза на ускоренной подаче возвращается в точку О (исходная точка — ИТ).

САП позволяет визуально (на дисплее) проконтролировать подготовленную УП при работе в двух режимах — автоматическом (выполнение всего цикла обработки без останова) и наладочном (выполнение отдельных кадров и остановов УП в любом месте по команде оператора). Для анализа и проверки качества подготовки УП вначале можно визуально проконтролировать траекторию движения фрезы в автоматическом режиме (это грубая оценка в первом приближении). При этом визуально можно обнаружить грубые ошибки в УП:

- несоответствие направления фрезы требуемому (например, вместо движения по часовой стрелке — против часовой);
- несоответствие снимаемого с заготовки припуска установленной величины (например, траектория фрезы не параллельна контуру заготовки, сдвинута);
- несоответствие скорости движения фрезы, требуемой на различных участках.

Для более точного контроля УП можно проверить каждый кадр с остановкой в наладочном режиме. После внесения коррекции получать листинг (распечатку УП).

Для внесения изменений в УП предусмотрены резервные места, поэтому номера кадров в УП следуют с интервалами 0–5–10–15–...–100.

Листинг УП

% 1:N05 G02 D01 X033 Y033 Z033 I033 J033 F03 S04 T01 M02

(Программа обработки по контуру)

: главный кадр

NOT су 120

N 5 G 90
 N 10 M03
 N 15 S600
 N 20 F 200
 0 N 25 G 00 X — 15.000 Y — 120.000 Z — 5.000
 1 N 30 G 00 X — 15.000 Y — 10.000
 N 35 F 100
 2 N 40 G 01 X+100.000 Y — 10.000
 N 45 F 50
 3 N 50 G 03 X+125.981 Y+35.000 I+0.000 J+30.000
 4 N 55 G 01 X+125.981 Y+40.000
 5 N 60 G 01 X+100.000 Y+40.000
 N 65 F 100
 6 N 70 G 01 X — 10.000 Y+117.000
 7 N 75 G 01 X — 10.000 Y — 2.000
 N 80 F 200
 N 85 G 00 Z+5.000
 0 N 90 G 00 X — 15.000 Y — 120.000
 N 95 M 11
 N 99 M 02
 N 100 M 30

Листинг позволяет сделать точный анализ качества УП, выявить ошибки (и неточности) программирования. Для этого целесообразно использовать специальную таблицу для анализа (табл. 4.1), куда записывается каждый кадр всей УП, соответствующая кадру опорная точка, участок эквидистанты, координаты точек и комментарии (выводы проектировщика). В комментариях анализируется каждый элементарный участок УП и его особенности (правильность выбранных подго-

Таблица 4.1

Анализ качества УП и выявление ошибок программирования на стадии моделирования

Опорная точка	Кадр	Участок эквидистанты	Координата		Комментарии
			X	Y	
0	25	—	-15	-120	Ноль «плавающий» в точке 0 (центр фрезы)
1	30	0-1	-15	-10	Выход фрезы в точку 1 на ускоренной подаче $F_{y,n} = 200$ мм/мин, G00
2	40	1-2	+100	-10	Выход фрезы в точку 2. Обработка участка A $F_{p,n} = 100$ мм/мин

Опорная точка	Кадр	Участок эквидистанты	Координата		Комментарии
			X	Y	
3	50	2–3	+125,981	+35	Обработка криволинейного участка B–C. Выход фрезы в точку 3 Круговая интерполяция G03
4	55	3–4	+125,981	+40	Сдвиг фрезы в точку 4 (БЕЗ обработки) — коррекция, чтобы не было «подреза» на участке CD. G01°
5	60	4–5	+100	+40	Обработка участка CD. Расчет координат в первом приближении. Затем нужна коррекция
6	70	5–6	–10	+117	G01°. Линейная интерполяция на участке DE
7	75	6–7	–10	–2	Обработка участка ED. G01°. $F_{p.l} = 100$ мм/мин
«0»	90	7–«0»	–15	–120	Возврат фрезы в точку 0 на ускоренной подаче $F_{y.l} = 200$ мм/мин

товительных и вспомогательных функций, подач, скоростей вращения, вида интерполяции, коррекция, точность рассчитанных координат опорных точек).

Вопросы для самопроверки

1. Какие задачи решает станок с ЧПУ?
2. Как происходит преобразование информации при изготовлении деталей на станках с ЧПУ?
3. Как формируется общая погрешность обработки на станках с ЧПУ?
4. Какие принципы учитывают при построении операций на станках с ЧПУ?
5. В какой последовательности разрабатывают ТП и УП?
6. Перечислите особенности изготовления деталей на станках с ЧПУ.
7. Какие типовые схемы переходов применяют при токарной обработке?
8. Какие схемы применяют для удаления припуска при токарной обработке?
9. Какие методы формирования траектории фрезы применяют при фрезеровании?
10. Управляющая программа и этапы ее подготовки при проектировании технологических процессов.
11. Назовите основные элементы (части) в организационной структуре системы автоматизированного проектирования ТП и управления процессом обработки в условиях ГАП.
12. Назначение систем автоматизации программирования и их основных блоков.

13. Назовите правила записи управляющей программы на языке САП ТЕХТРАН.
14. Как записывается управляющая программа на языке САП ЕХАРТ-2?
15. Какие функции выполняет проектировщик и ЭВМ при подготовке УП в интерактивном режиме (режим диалога)?
16. Как обозначают (и расположены) координатные оси и характерные точки в рекомендациях ISO?
17. Перечислите способы задания размеров деталей при программировании и назовите их особенности.
18. Опишите структуру и последовательность кадров при подготовке УП.
19. Что такое кадр, его содержание и правила записи в УП?
20. Что такое информационные слова, их название и порядок записи в кадре?

Глава 5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ

5.1. Определение структуры и основных характеристик производственного процесса

Высокий уровень автоматизации производственных процессов может быть достигнут благодаря разработке и использованию интегрированных производственных комплексов (ИПК), которые обеспечивают автоматизацию всех операций по всему циклу производства, начиная от получения заказов на изготовление изделий и кончая их поставкой потребителю.

Создание предприятий (рис. 5.1) на базе таких ИПК возможно при конструктивной, технологической, энергетической, организационно-производственной, информационной и программно-алгоритмической совместимости элементов, входящих в состав производственной системы. Совместимость обеспечивает синхронность работы всех специализированных производств предприятия: литейного, кузнечно-прессового, испытательного и др. Интегрированный производственный комплекс объединяет ГПС всех указанных производств.

При проектировании автоматических и автоматизированных производственных процессов необходим правильный выбор объектов производства для создания подразделений ИПК. Для этого следует исходить из оценки организационно-технологической структуры действующего предприятия, обусловливаемой специализацией ее производственных подразделений — цехов, участков, т. е. из оценки соответствия их специализации и типу производства продукции. Для вновь проектируемого предприятия такую структуру необходимо установить.

Основными составляющими ИПК являются ГПС, реализующие части производственного процесса. По назначению их подразделяют на три класса: для выполнения технологических процессов узловой или общей сборки; для изготовления полуфабрикатов или деталей; комбинированные — для изготовления деталей и сборки на них сборочных единиц или

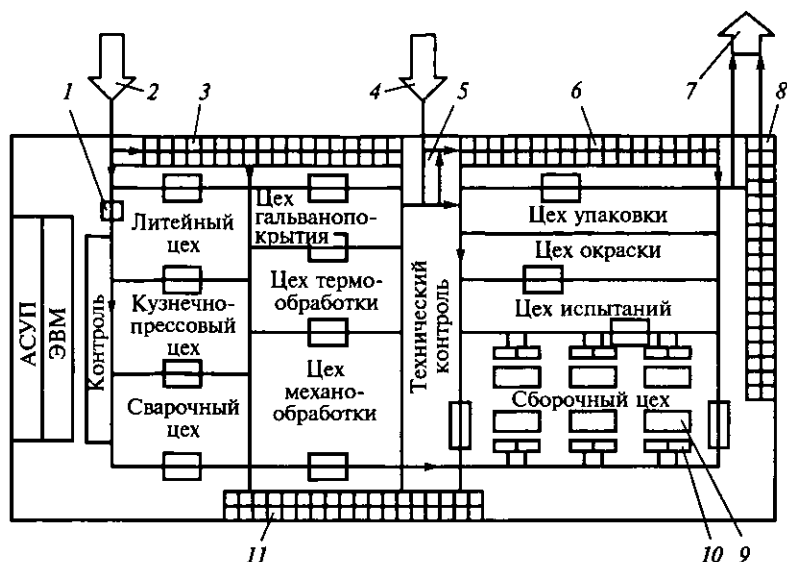


Рис. 5.1. Схема ГПС предприятия:

1 — роботар; 2 — ттрасса подачи материала на склад или в цеха; 3 — автоматический склад материала; 4 — ттрасса подачи покупных комплектующих изделий на склад или в цеха; 5 — участок расконсервации комплектующих изделий; 6 — автоматический склад комплектующих изделий; 7 — отправка изделий; 8 — автоматический склад изделий; 9 — сборочный центр; 10 — накопитель собираемых компонентов и собранных объектов; 11 — автоматический склад инструмента и приспособлений

изделий. По структуре ГПС подразделяют на узкономенклатурные и широкономенклатурные.

Структура ГПС состоит из двух компонентов: производственной структуры и технологической структуры. Технологическая структура включает номенклатуру собираемых или изготавливаемых деталей, сопрягаемых или обрабатываемых поверхностей, выполняемых операций с их взаимосвязями и характеризуется числом и типоразмером деталей, их классификационными признаками, последовательностью запуска: заготовок в производство и размером партии, характером операций, затратами времени на их выполнение, степенью гибкости технологического маршрута. Производственная структура включает в виде ряда элементов производственные подразделения (технологические модули, участки, линии, вспомогательные и доделочные отделения) и характеризуется годовой программой выпуска, суммарной трудоемкостью, производительностью, коэффициентом сменности, средними значениями коэффициентов загрузки и использования оборудования, составом элементов структуры, взаимосвязи между ними.

Организационно-техническая структура подразделяется на следующие структуры: организационную, характеризующую взаимосвязями подразделений ГПС и их внешними связями, формами организации труда, включая организацию переналадок и движения материальных потоков; функциональную, определяющую задачи отдельных подразделений и служб их обеспечения, функции обслуживающего персонала, содержание и форму документации; компоновочную, определяющую состав и расположение основного и вспомогательного технологического оборудования, складских и загрузочно-разгрузочных устройств, транспортные связи; информационно-управляющую, определяющую состав и распределение функциональных задач, технические средства, информационные потоки, средства программного обеспечения как системы управления ГПС в целом, так и ее отдельных подсистем.

Проектирование автоматизированных производственных процессов начинают с формирования массивов информации исходных данных, к которым относятся: номенклатура изделий, подлежащих изготовлению, и предполагаемый объем выпуска; ресурсы; регламентируемые условия производства; критерий оценки проектных решений. Затем выбирают номенклатуру изделий, анализируют их конструктивно-технологические признаки; формируют групповые технологии, определяют число групп оборудования, число единиц оборудования в каждой группе, формируют структуру производства, определяют коэффициенты загрузки оборудования, решают вопросы рационального распределения фонда времени работы оборудования. Затем осуществляют системный анализ проектируемых вариантов, отражающих характеристики производственных процессов. На этом этапе рассматривают вопросы рационального проектирования фонда времени, работы оборудования, режимов его работы, качества производственного процесса. Под последним понимают уровни незавершенного производства и его составляющие в очередях в стадиях обработки и сборки; продолжительность производственного цикла; скорости производственного процесса и его этапов; производительность оборудования.

Далее решают задачи построения производственного процесса:

специализации и концентрации производства; создания участков по детальной и подетально-групповой специализации; организации многономенклатурных групповых линий; формирования РТК и гибких производственных модулей; оперативно-календарного планирования и т. д. К задачам оперативно-календарного планирования и управления относятся:

разработка линейных подетально-пооперационных календарных планов-графиков; построение оперативно сменно-суточных календарных планов-графиков; оперативный учет, контроль и регулирование производства.

Затем при наличии функциональных подсистем АТСС, АСКИО, САК, АСУ ТП, АСНИ, САПР, АСТПП увязывают с ними обобщенные характеристики производственного процесса.

5.2. Условия применения автоматической сборки

Цель автоматизации сборки — получение минимума затрат труда, заложенного в средствах автоматизации при выпуске заданного количества продукции.

На рис. 5.2, а приведена структура затрат на сборку заданного количества изделий в обычном неавтоматизированном (I) и автоматизированном (II) производстве; $З_1$ и $З'_1$ — затраты соответственно на изготовление сборочного оборудования с учетом проектно-конструкторской работы; $З_2$ и $З'_2$ — затраты на сборку заданного числа выпускаемых изделий. Все величины даны в единичном масштабе, который характеризует затраты ручного труда. Повышение производительности общественного труда при переходе к автоматизированному производству обеспечивается при

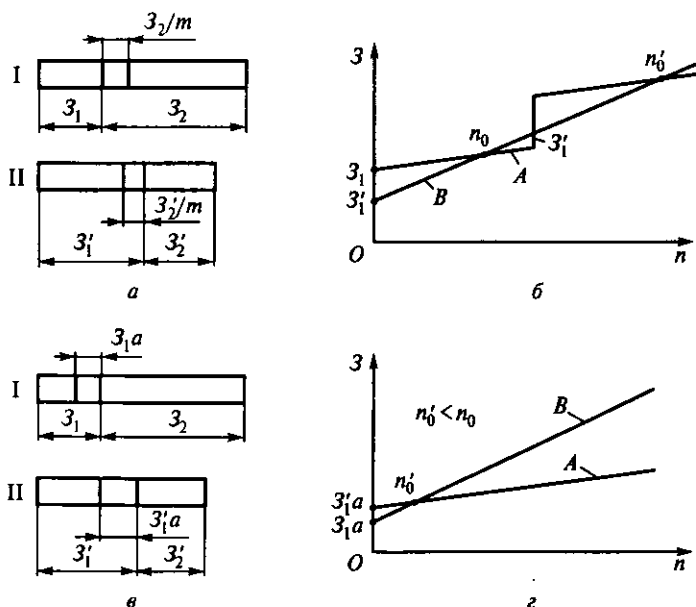


Рис. 5.2. Структура затрат труда на сборку изделий в неавтоматизированном (I) и автоматизированном (II) производстве в зависимости: а — от программы выпуска; б — от числа выпускаемых изделий в автоматизированном производстве; в — от числа наименований изделий в серийном производстве; г — критического значения объема выпуска

условии $3'_1 + 3'_2 < 3_1 + 3_2$. При уменьшении программы выпуска изделий в m раз затраты 3_2 и $3'_1$ пропорционально снижаются до величины $3_2/m$ и $3'_1/m$. Таким образом, указанное условие не выполняется и не обеспечивается экономия общественного труда при переходе к автоматизированному производству. С ростом объема выпуска изделий эффективность автоматизации увеличивается. Линия A (рис. 5.2, б) характеризует зависимость затрат 3 общественного труда от числа n выпускаемых изделий в автоматизированном производстве, а линия B — в неавтоматизированном. Точка n_0 характеризует объем выпуска изделий, при котором оба производства по затратам 3 являются равноценными, т. е. $3'_1 + T'_2 n_0 = 3_1 + T_2 n_0$, где T_2 и T'_2 — трудоемкость сборки одного изделия в неавтоматизированном и автоматизированном производстве соответственно. Таким образом, $n_0 = (3'_1 - 3_1)/(T_2 - T'_2)$.

В условиях массового производства, когда каждая операция сборки закреплена за отдельным рабочим местом при определенной программе выпуска, может потребоваться увеличение количества средств автоматизации (автоматы-дублиеры), что повышает затраты $3'_1$. На линии A это показано в виде уступа. Критическое значение программы выпуска повышается до $n'_0 = (23'_1 - 3_1)/(T_2 - T'_2)$.

При использовании для изготовления изделий нескольких наименований (серийное производство) быстро переналаживаемого автоматического оборудования эффективность автоматизации производства изделия одного наименования возрастает по сравнению с выше рассмотренным случаем. Величины 3_1 и $3'_1$ уменьшаются до значений $3_1 a$ и $3'_1 a$, где $a = 1/K < 1$; K — число наименований изделий, закрепленных за данным оборудованием (при условии, что время t сборки партий этих изделий примерно одинаково). При этом $3_1 a < 3'_1 a$.

Структура затрат труда для данного случая показана на рис. 5.2, в. Критическое значение объема выпуска (рис. 5.2, г) при этом составляет $n'_0 = a(3'_1 - 3_1)/(T_2 - T'_2)$.

Себестоимость сборки снижают путем сокращения всех издержек производства в сборочном цехе. В автоматизированном производстве эта задача имеет определенную специфику. Укрупненную структуру себестоимости сборки одного изделия в неавтоматизированном (I) и автоматизированном (II) производстве можно представить схемами, приведенными на рис. 5.3, а, где Π и Π' — заработная плата сборщиков, Π и Π' — цеховые расходы, учитывающие все остальные издержки производства (амортизацию сборочного оборудования, расходы на его ремонт, электроэнергию, заработную плату вспомогательных рабочих и т. д.). При автоматизации уменьшаются расходы на заработную плату сборщиков, а цеховые расходы снижаются незначительно и в отдельных случаях могут возрасти.

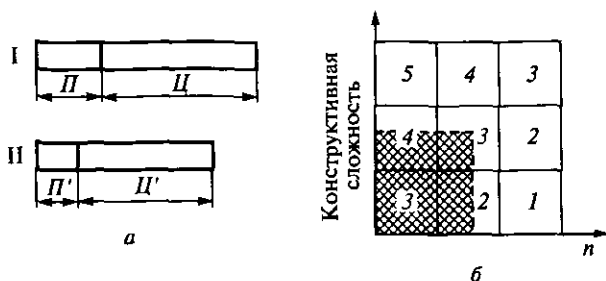


Рис. 5.3. Структура себестоимости сборки (а) и зоны применяемости автоматической сборки (б):

1-5 — условия соответственно очень хорошие, хорошие, удовлетворительные, плохие и очень плохие

Зоны применяемости автоматической сборки при использовании специальных средств автоматизации (непереналаживаемые автоматы и полуавтоматы) показаны на рис. 5.3, б. Заштрихованный участок определяет зону использования быстропереналаживаемых средств автоматизации сборки — сборочных роботов с программным управлением. Наиболее просто автоматизировать общую сборку простых по конструкции изделий, состоящих из нескольких элементов. Для более сложных по конструкции изделий применяют узловую автоматическую сборку. При усложнении конструкции изделий используют частичную автоматическую сборку.

На рис. 5.4, а приведена зависимость себестоимости C автоматической сборки от объема n выпуска изделий. С увеличением объема выпуска себестоимость сборки снижается, что обусловлено возможностью построения сборочных операций с высокой степенью концентрации технологических переходов. Если программа выпуска незначительна, то выгодно использовать универсальные средства автоматизации.

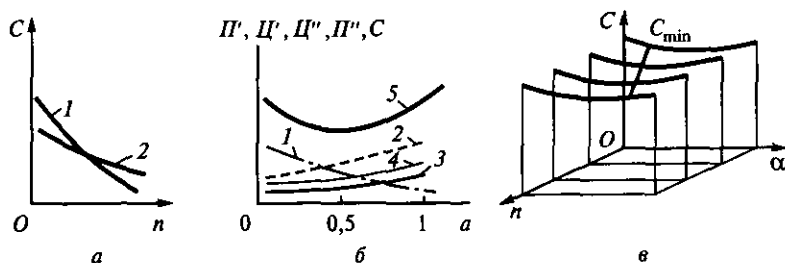


Рис. 5.4. Зависимость себестоимости автоматической сборки:

а — от программы выпуска изделий (1 — специальное оборудование; 2 — универсальное оборудование); б — для условий массового производства (1 — Π' ; 2 — Π'' ; 3 — Π''' ; 4 — Π'' ; 5 — C); в — от программы выпуска и уровня автоматизации

Под уровнем автоматизации α сборки понимают отношение продолжительности сборки t_s на автоматизированных операциях к общей продолжительности t_c технологического процесса сборки данного изделия $\alpha = t_s/t_c$. На рис. 5.4, б показана зависимость Π' (кривая 1) и $\mathcal{C}'$ (кривая 2) для условий массового производства. С ростом α применяемое технологическое и предметно-транспортное оборудование конструктивно усложняется и удорожается, что приводит к увеличению амортизационных отчислений по каждой единице сборочного оборудования на одно изделие. При этом сокращается число единиц используемого оборудования.

Общие амортизационные отчисления на одно изделие растут не так интенсивно и в ряде случаев могут даже уменьшаться. С ростом α повышается мощность средств автоматизации, поэтому увеличиваются расходы (кривая 3) на все виды потребляемой энергии (электрический ток, сжатый воздух, газ и др.). Число наладчиков возрастает в 2–3 раза, ремонтных рабочих — в 1,5–2 раза. Заработная плата Π'' инженерно-технического и вспомогательного персонала увеличивается в 1,5–2 раза (кривая 4). Увеличиваются расходы на более сложные, а следовательно, дорогие инструменты и технологическую оснастку. При автоматизации сборочного производства уменьшаются потребные производственные площади. Поэтому амортизационные затраты на ремонт и содержание зданий и сооружений снижаются. Зависимость суммарных расходов — себестоимость сборки одного изделия — от α характеризует кривая 5. Программы n и α определяют в каждом конкретном случае наименьшую себестоимость $C_{\min}$ автоматической сборки одного изделия (рис. 5.4, в).

Объем выпуска n непостоянен. Началу выпуска изделий предшествует разработка ТП сборки — участок I (рис. 5.5, а). Далее следуют этапы конструирования, изготовления и отладки сборочного оборудования и оснастки — участок II; эту работу выполняют, если невозможно приобрести готовое оборудование. Затем начинается выпуск изделий, который постоянно увеличивается до заданного значения — участок III. Этот участок характеризует освоение изделий в производстве; он должен быть по возможности коротким, а кривая роста выпуска изделий более крутой. На участке IV выпуск изделий постоянен, а на участке V — постепенно уменьшается до нуля. Последний участок характеризует сокращение выпуска изделий, обусловленное уменьшением спроса на них и их моральным устареванием. Этот участок характеризует также выпуск запасных частей.

С уменьшением выпуска изделий A начинается выпуск изделий B, а далее изделий C и т. д. с повторением всех указанных частей цикла сборочного производства. При $A=B=C$ кривые суммируются. Из условий постоянства загрузки сборочного цеха во времени суммарная кривая должна представлять прямую линию L, параллельную оси абсцисс. Это условие обеспечивается при совмещении и равенстве участков III (рис. 5.5, б)

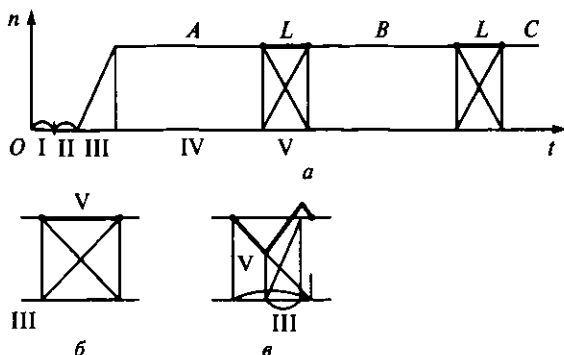


Рис. 5.5. Схема последовательности выпуска изделий *A*, *B* и *C* во времени:

a — участка сборки; *б* — при совмещении участков и их равенстве; *в* — при относительном смещении участков и их неравенстве

и *V*. Если данные участки не равны, то при разном их относительном смещении на суммарной кривой возникают выступы и впадины (рис. 5.5, *в*), характеризующие перегрузку и недогрузку сборочного оборудования цеха, что нежелательно в автоматизированном производстве.

Специальное сборочное оборудование конструируют на основе четко проработанного технического задания. Изменение затрат во времени на изготовление сборочного оборудования показано на рис. 5.6. Участок *OA* характеризует расходы на конструирование, *AB* — на изготовление, *BC* — на отладку оборудования.

Автоматическую сборку в основном используют в массовом производстве. Сроки окупаемости средств автоматизации часто превышают предполагаемую длительность выпуска изделий. В таких случаях автоматизацию проводят, используя быстроперенастраиваемое сборочное оборудование, принципы групповой технологии, типизацию ТП. Автоматическое сборочное оборудование создают из типовых узлов и исполнительных механизмов. В условиях серийного производства применяют сборочные роботы.

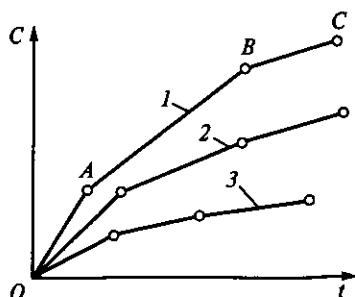


Рис. 5.6. Зависимость расходов от выпуска изделий *A*, *B* и *C* во времени:

1 — при недостаточной конструкторской проработке; 2 — при детальной конструкторской проработке; 3 — при сборке стандартных узлов методом агрегатирования

В мелкосерийном и единичном производстве автоматическая сборка выполняется специализированным оборудованием с программным управлением и роботами. Автоматизируется в основном узловая сборка. Автоматизацию общей сборки используют лишь для изделий простой конструкции.

5.3. Последовательность проектирования технологического процесса автоматической сборки

При разработке ТП автоматической сборки технолог-сборщик или группа технологов должны определить состав выпускаемого изделия, технологический маршрут операций и приемы сборки, выбрать оборудование или разработать структуру сборочного оборудования, выполнить экономический анализ, обоснование и расчет выбранного варианта автоматизации, рассчитать режимы оборудования, осуществить специальные исследования. Должны быть детально проработаны вопросы ориентации, базирования, транспортирования и контроля качества изделий, а также разработки технических заданий на конструирование специальных исполнительных устройств и оснастки. Проектные работы выполняют обычным способом или с использованием средств автоматизации проектирования ТП.

Разработанный ТП автоматической сборки является основой конструкторской, строительной, транспортной, энергетической и организационной частей проекта. На основе технологии определяют потребность в оборудовании, производственную площадь, рабочую силу, основные и вспомогательные материалы, решают вопросы специализации, кооперирования сборочного производства.

Технологический процесс автоматической сборки изделия включает следующие этапы: подготовку деталей и комплектующих изделий (промывка, очистка, деконсервация, предварительный или 100 %-ный контроль комплектования и т. д.); загрузку сопрягаемых деталей в бункерные, магазинные, кассетные и другие загрузочные устройства в предварительно или окончательно ориентированном; захват, отсекание и подачу сопрягаемых деталей в ориентирующие и базирующие устройства сборочного приспособления; ориентацию сопрягаемых деталей на сборочной позиции с точностью, обеспечивающей собираемость соединений; соединение и фиксацию сопряженных деталей с требуемой точностью; контроль требуемой точности относительного положения сопряженных деталей или сборочной единицы; выполнение послесборочных операций (например, контроль на выходе, заправка смазочными материалами, топливом, испытание, регулирование, балансировка, маркировка, упаковка, счет, учет).

Построение ТП зависит прежде всего от конструктивных особеннос-

тей выпускаемых изделий — габаритных размеров, числа входящих в изделие деталей и сборочных единиц, характера и сложности соединений. Особенности собираемого изделия и программа выпуска определяют структурную схему ТП автоматической сборки, последовательность выполнения его операций, их повторяемость, параметры автоматического оборудования и условия его настройки. Нерационально спроектированная технология вызывает потери времени при эксплуатации сборочного оборудования. При проектировании ТП автоматической сборки необходимо учитывать: программу выпуска изделий; технологичность конструкции изделия и составляющих его элементов; обеспечение качества собираемого изделия; распределение переходов по сборочным позициям по времени их выполнения; точность и надежность относительной ориентации сопрягаемых деталей соединений; надежность выполнения соединений; контроль качества собираемого изделия или его частей; наладочные параметры сборочных устройств; организацию производства.

Перед тем как решать комплекс задач автоматизации сборки изделия, нужно проанализировать его служебное назначение, технические требования, определить способ сборки, всех его операций (основных и вспомогательных), формирующих изделие и его качественные параметры. Модель формирования качества изделия можно представить в следующем виде:

$$x_i(t) \rightarrow U_j(t) \rightarrow \theta_k(t),$$

где $x_i(t)$ — множество параметров исходных сборочных компонентов (материалов деталей, сборочных единиц, комплектующих изделий и т. д.); $U_j(t)$ — множество промежуточных параметров сборочных единиц, формируемых текущей операцией; $\theta_k(t)$ — выходные параметры изделия. Индексом i обозначено текущее значение параметра, а стрелками — направление потока формирования параметров. При этом учитывается и собираемость изделий, которая зависит от физических и размерных параметров сборочных компонентов и всего процесса сборки. Размерные параметры сопрягаемых поверхностей определяются точностью их изготовления.

Последовательность этапов проектирования технологии сборки показана на рис. 5.7.

Сбор исходных данных. К исходным данным для проектирования ТП автоматической сборки относятся: информация сборочных чертежей и технических условий или формализованное описание объектов сборки; технико-экономические требования, содержащие сведения о номенклатуре и программе выпуска изделий, производительности и стоимости сборочного оборудования, сроках освоения выпуска, допустимом времени сборки; технические требования (точность сборки, условие работы изделия и т. д.).

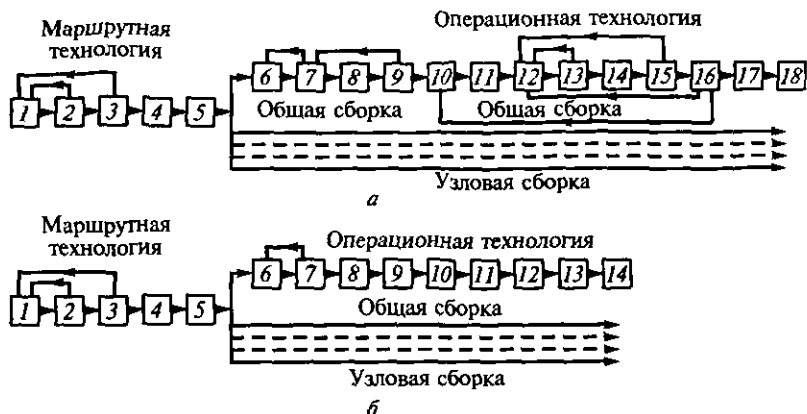


Рис. 5.7. Последовательность этапов проектирования технологии сборки для производства:

a — поточно-массового; *б* — серийного; 1 — сбор исходных данных; 2 — анализ исходных данных; 3 — составление технологических схем; 4 — для поточно-массового — расчет темпа и определение типа производства, для серийного — определение размера партии; 5 — выбор организационных форм сборки; 6 — выбор баз; 7 — разработка маршрута и содержания операций; 8 — для поточно-массового — выбор типа оборудования, для серийного — выбор имеющегося оборудования; 9 — определение норм времени; 10 — уточнение содержания операций; 11 — выбор модели оборудования; 12 — определение режима сборки; 13 — уточнение норм времени; 14 — выбор оснастки и разработка технологических условий на ее изготовление; 15 — определение количества и загрузки оборудования; 16 — балансировка поточных линий; 17 — определение межоперационных заделов; 18 — оформление документации

Анализ исходных данных. В сборочном чертеже изделия должны быть приведены: нужные проекции и разрезы; спецификация составляющих его элементов; посадки в сопряжениях; масса изделия и его составных частей. В технических условиях должны быть указаны: точность сборки, качество сопряжений, их герметичность, жесткость стыков, моменты затяжки резьбовых соединений, точность балансировки вращающихся частей, методы выполнения соединений, желательная последовательность сборки, методы промежуточного и окончательного контроля изделий. На основе рекомендаций по технологичности конструкции изделий определяют, необходимы ли конструктивные изменения, обеспечивающие автоматическую сборку. Если изменения внести невозможно, сборку данной части изделия (на данной операции) выполняют вручную или с использованием средств механизации. Анализ конструкции изделия и составляющих его деталей позволяет определить, какой вид сборки по степени автоматизации рациональнее применить.

Составление технологических схем автоматической сборки. Анализ конструкции и изучение технических условий на изделие заканчивают составлением технологических схем общей и узловой сборки изделия. Это первый этап разработки ТП. Технологические схемы сборки составляют

на основе анализа сборочных чертежей изделия. Они отражают маршрут сборки изделия и его составных частей. На этом этапе выявляют оптимальную степень расчленения изделия на составляющие элементы и выбирают возможные методы автоматической сборки различных соединений. Разрабатывают различные технологические варианты схем сборки, содержащие сведения о целесообразности дифференциации и концентрации операций, возможных вариантах схем базирования, относительной ориентации деталей и их закрепления. Рассчитывают условия собираемости деталей. Выбирают бункерные ориентирующие, транспортные, контрольные и другие устройства. На основе технико-экономического анализа выбирают наиболее рациональный вариант оборудования для сборки.

Последовательность сборки определяют на основе анализа размерных цепей изделия, каждая из которых предназначена для решения конкретной задачи. Определяя последовательность сборки, учитывают функциональную взаимосвязь элементов изделия, конструкцию базовых элементов, размеры и массу присоединяемых элементов, степень их взаимозаменяемости, а также то, что легко повреждаемые элементы желательно устанавливать в конце сборки.

Наглядное представление о технологичности изделия дают схемы сборки, предусматривающие выделение ступеней ТП. Можно также использовать форму схемы сборки, показывающей расположение собираемых элементов с указанием технологической последовательности сборки (рис. 5.8). За исходную принимают базовую деталь $1-1$, к которой присоединяются по две детали $1-2$ и $1-3$. В результате этого образуется сборочная единица. К этой сборке присоединяется вторая сборочная единица, образованная из деталей $2-1$, $2-2$, $2-3$ и т.д. Детали на схеме обозначены прямоугольниками, внутри которых дается индексация и в нижней части — наименование деталей. Сборочной единице присваивается порядковый номер сборочной единицы (узла) $i = (\overline{1, n})$. Этим же номером отмечают и отдельные детали, входящие в i -ю сборочную единицу. Изделие, собранное по данной схеме, имеет три ступени сборочных единиц. Однако подобные схемы не дают четкого представления о связях между отдельными элементами всего сборочного процесса и не позволяют выявить его рациональную структуру, связанную с выполняемыми работами.

Наибольшей информативностью обладают технологические схемы общей и узловой сборки, на которых указывают не только технологические, но и вспомогательные операции, обусловленные особенностями автоматической сборки — контроль, поворот или перевертывание собираемого объекта, смазывание и др. (рис. 5.9). Детали и сборочные единицы на схеме изображаются прямоугольниками с индексацией номеров (наименований), а операции — кружками с последовательной нумерацией.

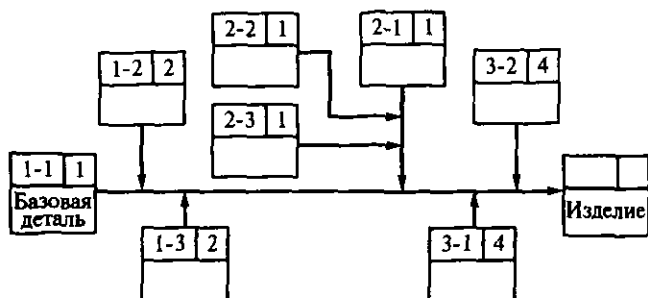


Рис. 5.8. Схема расположения сборочных элементов при соединении деталей

При этом под операцией при многооперационной автоматической сборке понимают действия над собираемым объектом, выполняемые на определенной рабочей позиции автоматического оборудования. Позиции связаны между собой транспортной системой. На схемах следует обозначить участки ручной и механизированной сборки, на которых автоматизированная сборка затруднена или невозможна.

Определение типа производства. Типы производства в сборочном цехе определяют отдельно для изделия и его составных частей, так как они могут быть различными. При поточно-массовом производстве автоматическую сборку изделий выполняют на высокопроизводительных специальных автоматических линиях, в том числе переналаживаемых. При среднесерийном производстве сборку осуществляют партиями на автоматическом оборудовании. Используют также переменнo-поточные или групповые автоматические линии для конструктивно или технологически сходных изделий. Гибкие автоматические линии строят на базе гибких

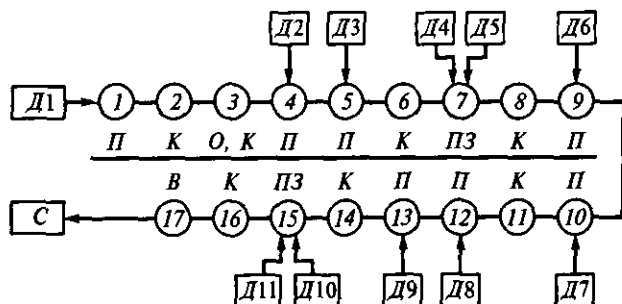


Рис. 5.9. Технологическая схема сборки:

Д — деталь; П — подача и установка присоединяемой детали в приспособлении или на базовую деталь; К — контроль; О — обработка; З — закрепление; С — сборочная единица

производственных модулей (ГПМ), автоматизированного транспортного оборудования и автоматизированных рабочих мест (АРМ) с управлением от центральной ЭВМ. Для ГАЛ характерны поточные методы организации сборки, высокие синхронизация операций и производительность. В мелкосерийном многономенклатурном производстве сборку выполняют на оборудовании с микропроцессорным управлением, обслуживаемым автоматизированной транспортной системой, которая вместе с ЭВМ образует гибкий автоматизированный участок сборки.

При поточном методе работы штучное время на операцию должно быть несколько меньше темпа сборки для создания резерва на случай задержек сборки или кратно темпу. Коэффициент загрузки оборудования должен быть высоким (не менее 0,95). На первых операциях поточной линии его нужно брать меньше, чем на последних операциях сборки. Это обеспечивает большую надежность работы линии в случае отказов оборудования.

Выбор организационной формы автоматической сборки. Организационную форму сборки следует выбирать в зависимости от конструкции изделия, его размеров, массы, программы и срока выпуска. Организационную форму сборки устанавливают отдельно для изделия и его составных частей. В общем случае они могут быть разными. Вариант организационной формы автоматической сборки конкретного изделия выбирают на основе расчетов себестоимости сборки с учетом сроков подготовки и оснащения производства необходимым оборудованием.

В зависимости от организационных форм различают автоматическую сборку, стационарную и конвейерную. Стационарную сборку выполняют на специальном оборудовании или посредством ПР. Ее в основном используют в массовом и серийном производстве для сборки небольших узлов. Конвейерную сборку на автоматических линиях в большинстве случаев выполняют с периодической остановкой собираемого изделия. Сборка с непрерывным перемещением изделия осуществляется на конвейерах, оснащенных ПР, а также на роторных автоматических линиях.

Разработка маршрутной технологии общей и узловой автоматической сборки. Маршрутную технологию составляют на основе технологических схем сборки. Она включает в себя все технологические, контрольные и вспомогательные операции, выполняемые автоматически или вручную. Содержание операций устанавливают в зависимости от выбранного типа производства и темпа сборки. При построении маршрутной технологии нужно стремиться к одновременному выполнению (объединению) нескольких операций, что обеспечивает сокращение цикла сборки и потребности в производственных площадях. При массовом производстве содержание операции должно быть таким, чтобы ее длительность была несколько меньше темпа сборки или кратно ему.

При серийном производстве содержание операции принимают таким, чтобы узловая и общая сборка изделий обеспечивали высокую загрузку оборудования.

Для общей сборки

$$\left[\left(\sum_{i=1}^n t_{\text{сб}} N_i \right) + \left(\sum_{i=1}^n T_{\text{п.з.и}} \right) k \right] m \leq \Phi,$$

где n — число наименований изделий; $t_{\text{сб}}$ — штучное время общей сборки i -го изделия; N_i — годовая программа выпуска i -го изделия; $T_{\text{п.з.и}}$ — подготовительно-заключительное время для i -го изделия; k — число партий в год; m — число станков для общей сборки; Φ — эффективный годовое фонд времени работы.

При использовании автоматического сборочного оборудования штучное время определяют без учета организационного обслуживания $t_{\text{ог}}$ и перерывов в работе $t_{\text{п}}$. Производительность, шт/мин, сборочного автомата или полуавтомата

$$Q = 1/T_{\text{ц}} = 1/t_{\text{оп}} = 1/(t_0 + t_{\text{в}}),$$

где $T_{\text{ц}}$ — время рабочего цикла оборудования, мин; $t_{\text{оп}}$ — оперативное время; t_0 — основное время; $t_{\text{в}}$ — вспомогательное время.

Вспомогательное время $t_{\text{в}}$ в данном случае представляет собой цикловые потери. Если $t_{\text{в}}=0$, то $T_{\text{ц}}=t_0$ и $Q=1/t_0$.

Техническая производительность оборудования

$$Q = 1/(t_0 + t_{\text{в}} + t_{\text{ц}}),$$

где $t_{\text{ц}}$ — внецикловые потери, учитывающие затраты времени на смену и подналадку инструмента, регулирование оборудования.

Величину $t_{\text{ц}}$ относят ко времени одного цикла.

В условиях автоматизации устанавливают норму времени на сборку единицы продукции и норму, заданную рабочему (бригаде рабочих) и выраженную в единицах продукции (численности рабочих).

При построении маршрутной технологии необходимо выделить операции с большой вероятностью отказов и предусмотреть на данном этапе производственные заделы. На основе маршрутной технологии разрабатывают техническое задание средств автоматизации. При разработке определяют тип технологического и транспортного оборудования, которое затем уточняют на последующих этапах проектирования технологии сборки.

Выбор технологических баз, схем базирования изделия при узловой и общей автоматической сборке. Ответственным этапом проектирования ТП автоматической сборки является выбор технологических баз и схем базирования, которые должны обеспечить заданную точность сборки, удобство ее выполнения, простоту конструкций приспособлений, оборудо-

вания и транспортных средств. При выборе технологических баз стремятся выдержать принципы совмещения, постоянства и последовательности смены баз. В каждом конкретном случае может быть использовано несколько схем базирования. При анализе схем рассчитывают погрешности установки. Если предусмотрена организованная смена баз, то пересчитывают соответствующие размеры и допуски на них, определяют допуски на параметры технологических баз. Для сокращения числа вариантов схем базирования следует применять типовые решения. Технологические базы выбирают с учетом обеспечения удобства установки и снятия собираемого изделия, надежности и удобства его закрепления, возможности подвода с разных сторон присоединяемых деталей и сборочных инструментов. Различают базирование базовой детали изделия или отдельной его части при их установке в сборочное приспособление и базирование сопрягаемых деталей при узловой или общей сборке.

Используют стационарные позиционные приспособления или приспособления-спутники. В обоих случаях следует соблюдать принципы совмещения и постоянства баз. Соединение двух деталей при автоматической сборке должно обеспечить их 100 %-ную собираемость.

Построение операций автоматической сборки. Этап построения операций сборки является наиболее трудоемким и сложным при проектировании технологии автоматической сборки. Он включает: уточнение содержания операций; повышение степени концентрации переходов; четкое разграничение всех составляющих элементов операции — от ориентации сопрягаемых деталей до удаления собираемой части изделия или его самого; технологические расчеты; определение сил запрессовки, затяжки резьбовых соединений, клепки и т. д.; определение штучного времени по элементам изделия и в целом.

На этом этапе определяют основную технологическую характеристику необходимого сборочного оборудования: структурную схему; кинематические и динамические параметры; размер рабочей зоны для размещения собираемого изделия с оснасткой; систему управления; степень автоматизации рабочего цикла; способность к переналадке. При отсутствии серийно выпускаемого оборудования разрабатывают техническое задание на его проектирование, при его наличии выбирают модель.

Разрабатывают техническое задание на конструирование специальных сборочных инструментов, сборочного приспособления с указанием принятых схем базирования, способов автоматической подачи и ориентации деталей и снятия готового изделия. Определяют методы необходимого контроля выполнения сборки, тип блокировочных устройств, предупреждающих аварийные ситуации и брак.

При проектировании операции сборки на многопозиционных станках и АЛ определяют загрузку оборудования по отдельным позициям,

строят циклограммы работы, устанавливают структуру и тип линии, необходимые заделы и накопители, конфигурацию линии в плане для ее стыковки со сложными участками сборочного цеха. Составляют техническое задание на проектирование линии.

Нормы времени на сборочные операции определяют расчетно-аналитическим методом.

5.4. Техничко-экономическая оценка вариантов технологического процесса автоматической сборки

Критерии для оценки спроектированных ТП сборки подразделяют на абсолютные и относительные.

К абсолютным критериям оценки ТП относят: трудоемкость ТП сборки; ее технологическую себестоимость; длительность цикла сборки; число единиц сборочного оборудования.

Трудоемкость ТП сборки определяется суммой штучного времени общей сборки изделия в технологической документации $t_{\text{шт.и}}$ по всем n ее операциям $T = \sum_{i=1}^n t_{\text{шт.и}}$. Этот показатель дают отдельно по узловой и общей сборке изделия.

Технологическая себестоимость выполнения узловой и общей сборки одного изделия

$$C = \sum_1^n (t_{\text{шт.у}} P_y + t_{\text{шт.о}} P_o) + \sum_1^{n'} t_{\text{шт.}} Z_m + \sum_1^{n''} T'_{\text{п.з}} P_n + [100(k_a + k_s) Z_o] / N,$$

где n — число сборочных операций; n' — число единиц сборочного оборудования; n'' — число переналаживаемых операций сборки; $t_{\text{шт.у}}$, $t_{\text{шт.о}}$ — штучное время соответственно узловой и общей сборки; P_y , P_o — минутная заработная плата при выполнении узловой и общей сборки; Z_m — стоимость 1 мин работы сборочного оборудования; $T'_{\text{п.з}}$ — подготовительно-заключительное время, отнесенное к одному изделию на одну операцию; P_n — минутная заработная плата одного наладчика; k_a , k_s — коэффициенты амортизации и эксплуатации сборочной оснастки ($k_a = 0,2 \dots 0,5$; $k_s = 0,2$); Z_o — стоимость всей сборочной оснастки; N — годовой выпуск изделий.

Стоимость 1 мин работы сборочного оборудования приближенно определяют по заводским данным или по формуле

$$Z_m = Z_a + Z_p + Z_s + Z_{a.з} + Z_{м.с}.$$

Здесь $Z_a = (Z_6 a) / \Phi$ — затраты на амортизацию оборудования (Z_6 — балансовая стоимость сборочной машины, руб.; a — процент амортизационных от-

числений; Φ — годовой фонд времени работы машины); $Z_p = \sum_1^{n'} K_n Z_{м.р} R_m t_{шт}$ — затраты на ремонт оборудования (K_n — коэффициент, учитывающий тип производства — $K_n = 0,9$ — для единичного, $K_n = 1$ для серийного, $K_n = 1,2$ — для массового производства); $Z_{м.р.}$ — затраты на малые ремонты, технические осмотры и межремонтное обслуживание первой категории сложности; R_m — категория сложности ремонта машины; Z_e — затраты на электроэнергию; Z_v — затраты на сжатый воздух; $Z_{а.з.}$ — затраты на амортизацию здания, отнесенные к площади, занимаемой сборочной машиной; $Z_{в.м.}$ — затраты на вспомогательные материалы; $Z_e = \sum_1^{n'} N_e K_e K_v Z'_e t_{шт} / 60$; $Z_v = \sum_1^{n'} (P_v Z_v t_o) / 60$, где N_e — установленная мощность электродвигателей, кВт; K_e, K_v — коэффициенты использования установленной мощности по времени и величине, $K_e, K_v = 0,5 \dots 0,9$; Z'_e — стоимость (затраты) 1 кВт · ч электроэнергии; P_v — среднечасовой расход воздуха, м³; Z_v — стоимость (затраты) 1 м³ воздуха, руб.; $t_{шт}$ — штучное время; t_o — основное (технологическое время); $Z_{а.з.} = \sum_1^{n'} (Z_a a F_m) / F_z$, где Z_a — стоимость (затраты) цехового здания; a — процент амортизационных отчислений; F_m — площадь, занимаемая сборочной машиной; F_z — площадь здания цеха; $Z_v = \sum_1^{n'} (Z_v t_{шт}) / (60 \Phi)$, где Z_v — затраты на вспомогательные материалы на единицу оборудования в год, руб.; $t_{шт}$ — штучное время; Φ — годовой фонд времени работы машины.

Длительность цикла общей (или узловой) сборки партии изделий из n штук в серийном (непоточном) производстве при их последовательной передаче определяют по формуле

$$T_{ц} = \sum_1^i t_{шт} n + t_x K_r + t_r (2K_r + 1),$$

где $\sum_1^i t_{шт}$ — сумма штучного времени всех i операций сборки данного объекта; t_x — время хранения партии изделий на промежуточном складе; K_r — число транспортировок изделий на промежуточный склад; t_r — время одной перевозки партии изделий от сборочной машины к складу и обратно; $2K_r + 1$ — величина, дополнительно учитывающая одну перевозку изделий на склад готовой продукции.

При поточной сборке ее длительность цикла из n штук изделий при темпе t определяют по формуле

$$T'_{ц} = t(i + n).$$

К относительным критериям относят:

коэффициент трудоемкости сборочного процесса $K_c = T_c/T_o$, где T_c — трудоемкость сборки изделия; T_o — трудоемкость обработки деталей изделия, для различных типов производств $K_c = 0,1-0,5$;

коэффициент себестоимости сборки $K_{с.с} = C/C_n$, где C_n — себестоимость изготовления изделия в целом;

коэффициент расчлененности сборочного процесса $K_p = T_y/T_o$, где T_y — трудоемкость узловой сборки; a — показатель уровня автоматизации сборки.

5.5. Типовые и групповые технологические процессы сборки

Типизация ТП сборки является основной формой их стандартизации. Она способствует уменьшению затрат на проектирование технологии, себестоимости производства изделий. Типовые ТП автоматической сборки базируются на классификации собираемых изделий, сборочных единиц и соединений по их конструктивным особенностям. Собираемые изделия и сборочные единицы классифицируют по общности их служебного назначения, видам соединений и по числу деталей, входящих в сборочную единицу.

Изделия или их составные части подразделяют на классы по общности технологических задач, возникающих при их сборке. Каждый класс изделий разделяют на подклассы, группы и подгруппы. При этом учитывают конструктивные признаки изделий, их размеры, обобщают решения технологических задач с целью нахождения общего подхода к проектированию технологии сборки отдельных изделий и их элементов. Определяют типовой представитель (один или несколько), которым является изделие (составная часть изделия), характеризующееся совокупностью признаков. Данные изделия имеют одинаковый маршрут операций, выполняемых на однотипном сборочном оборудовании с использованием однородных приспособлений и инструментов. В разрабатываемых классификациях учитывают производственные условия: серийность выпуска, частоту сменности объекта сборки. Работу по классификации завершают составлением классификаторов, что позволяет делить типизируемые объекты сборки по характерным конструктивным и технологическим признакам. Классификаторы оформляют в виде таблиц, в которых по вертикали и горизонтали отложены указанные признаки объектов сборки.

Затем разрабатывают общий ТП и устанавливают типовые последовательность и содержание операций, типовых схем базирования и конструкций оснастки. Если изделия унифицированы достаточно полно, то на них составляют одну общую технологическую карту с нормами времени.

При меньшей степени унификации на базе принципиального ТП составляют технологию для конкретных изделий. Типовой ТП автоматической сборки должен состоять в основном из типовых сборочных операций, а сборочные операции — из типовых технологических переходов, что позволяет выбрать типовое сборочное оборудование в его отдельные типовые механизмы.

Основой групповых ТП сборки является общность конструктивных особенностей изделий и технологии их сборки. Это дает возможность в условиях мелко- и среднесерийного производства выполнять ТП сборки, характерные для крупносерийного и массового производства, переходить от непоточного к поточному производству. Метод групповой технологии обладает большими возможностями унификации ТП, чем типовые ТП. При его использовании повышаются непрерывность, прямооточность и ритмичность производства.

В групповых поточных линиях оборудование располагают по маршруту сборки близких по конструкции и размерам изделий (или их частей) нескольких наименований. Все закрепленные за линией изделия собирают периодически партиями. В каждый момент времени линия работает как непрерывно-поточная. Переход к сборке другого изделия возможен без переналадки линии или с частичной, несложной переналадкой. Групповую технологию сборки следует использовать в пределах цеха или всего завода. Она должна охватывать весь комплекс выпускаемых изделий, что дает наибольший технико-экономический эффект. Групповые ТП в основном разрабатывают для узловой сборки; для общей сборки их используют редко и только для простых по конструкции изделий.

Проектированию групповых ТП или операций сборки предшествует классификация изделия. При подборке изделий в группу проводят анализ чертежей и технических условий, технологичности. Проектирование выполняют в такой последовательности:

- 1) подбирают группу изделий, удовлетворяющих требованиям групповой сборки; намечают маршрут сборки, содержание операций; ориентировочно определяют оперативное время сборки;

- 2) уточняют содержание операций и разрабатывают наладки для наиболее сложных изделий группы, которые выпускают в наибольшем количестве; разрабатывают наладки для других изделий группы; определяют штучное время сборки;

- 3) определяют требования к сборочному оборудованию;

- 4) разрабатывают конструкции сборочных приспособлений и инструментальной оснастки; уточняют режимы и условия выполнения операций сборки; окончательно устанавливают нормы времени;

- 5) составляют технологическую документацию на каждое изделие;

- 6) определяют технико-экономические показатели групповой сборки.

Вопросы для самопроверки

1. Какие параметры определяют условие применения автоматической сборки?
2. В какой последовательности проектируют автоматическое сборочное оборудование?
3. В чем заключается условие применения автоматической сборки?
4. Назовите последовательность проектирования технологического процесса автоматической сборки.
5. В чем заключается технико-экономическая оценка варианта технологического процесса автоматической сборки?
6. Дайте характеристику типовым ТП сборки.
7. Дайте характеристику групповых ТП сборки.
8. Из чего складываются общие затраты труда на сборку?
9. Как зависит себестоимость автоматической сборки от программы выпуска?
10. Как изменяются затраты по изготовлению сборочного оборудования во времени?

Глава 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ

6.1. Требования к математическим моделям и их классификация

Под математической моделью (ММ) ТП и его элементов понимают систему математических соотношений, описывающих с требуемой точностью изучаемый объект и его поведение в производственных условиях. При построении ММ используют различные математические средства описания объекта: теорию множеств, теорию графов, теорию вероятностей, математическую логику, математическое программирование, дифференциальные или интегральные уравнения и др.

К математическим моделям предъявляют требования высокой точности, экономичности и универсальности. Экономичность ММ определяется затратами машинного времени (работы ЭВМ). Степень универсальности ММ определяется возможностью их использования для анализа большего числа ТП и их элементов. Требования к точности, экономичности и степени универсальности ММ противоречивы. Поэтому необходимо иметь удачное компромиссное решение.

Степень универсальности ММ характеризует полноту отображения в модели свойств реального объекта. Однако ММ отражает лишь некоторые свойства объекта. Так, большинство ММ используют при функциональном проектировании, например, нахождение оптимальных режимов резания, расчет производительности и др. При этом не всегда требуется, чтобы ММ описывала все свойства объекта, как, например, геометрическая форма составляющих его элементов.

Точность ММ оценивают степенью совпадения значений параметров реального объекта и значений тех же параметров, рассчитанных с помощью оцениваемой ММ. Пусть отражаемые в ММ свойства оцениваются вектором выходных параметров $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$. Тогда, обозначив истинное и рассчитанное с помощью ММ значения j -го выход-

ного параметра через $y_{\text{ист}}$ и $y_{\text{м}}$ соответственно, определим относительную погрешность ϵ_j расчета параметра y_j как

$$\epsilon_j = (y_{\text{м}} - y_{\text{ист}}) / y_{\text{ист}}.$$

Таким образом, получена векторная оценка $\epsilon_j = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m)$. При необходимости сведения этой оценки к скалярной используют какую-либо норму вектора ϵ , например:

$$\epsilon = \|\epsilon\| = \max_{j \in [1; m]} \epsilon_j.$$

Адекватность ММ — способность отображать заданные свойства объекта с погрешностью не выше заданной. Поскольку выходные параметры являются функциями векторов параметров внешних Q и внутренних X , погрешность ϵ зависит от значений Q и X . Обычно значения внутренних параметров ММ определяют из условия минимизации погрешности $\epsilon_{\text{м}}$ в некоторой точке $Q_{\text{ном}}$ пространства внешних переменных, а используют модель с рассчитанным вектором X при различных значениях Q . При этом, как правило, адекватность модели имеет место лишь в ограниченной области изменения внешних переменных — области адекватности (ОА) математической модели:

$$\text{ОА} = \{Q | \epsilon_{\text{м}} \leq \delta\},$$

где $\delta > 0$ — заданная константа, равная предельно допустимой погрешности модели.

Экономичность ММ характеризуется затратами вычислительных ресурсов (затратами машинного времени $T_{\text{м}}$ и памяти $P_{\text{м}}$ на ее реализацию).

Основные признаки классификации и типы ММ, применяемые в САПР, приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Признаки классификации ММ

Признак классификации	Математические модели
Характер отображаемых свойств объекта	Структурные; функциональные
Принадлежность к иерархическому уровню	Микроуровня; макроуровня; метауровня
Степень детализации описания внутри одного уровня	Полные; макромодели
Способ представления свойств объекта	Аналитические; алгоритмические; имитационные
Способ получения модели	Теоретические; эмпирические

По характеру отображаемых свойств объекта ММ делят на структурные и функциональные.

Структурные ММ предназначены для отображения структурных свойств объекта. Различают топологические и геометрические структурные ММ.

Описание математических соотношений на уровнях структурных, логических и количественных свойств принимает конкретные формы в условиях определенного объекта. Например, множество параметров, влияющих на выбор скорости резания при различных методах обработки, можно представить в виде

$$M_v = \{T_n, m, t, s, d, B, c_v, k_v, x_v, y_v, z_v, r_v\}, \quad (6.1)$$

где T_n — стойкость инструмента, мин; m — показатель относительной стойкости инструмента; t — глубина резания, мм; s — подача, мм/об (мм/зуб, мм/дв.ход, мм/мин); d — диаметр обрабатываемой поверхности или диаметр инструмента; B — ширина обрабатываемой поверхности, мм; c_v — коэффициент, характеризующий условия обработки; k_v — поправочный коэффициент на скорость резания; x_v, y_v, z_v, r_v — показатели степени.

Логические соотношения между приведенными выше параметрами и скоростью резания имеют вид:

$$v = T_n \wedge m \wedge c_v \wedge k_v [(t \wedge x_v) \vee (s \wedge y_v) \vee (d \wedge z_v) \vee (B \wedge r_v)], \quad (6.2)$$

причем T_n, m, c_v и k_v всегда истинны, а истинные значения других переменных зависят от метода обработки резанием.

Формулы количественных соотношений между параметрами с учетом истинности их логических значений имеют следующий вид:

при наружном точении

$$v = \frac{c_v k_v}{T_n^m t^{x_v} s^{y_v}}; \quad (6.3)$$

при сверлении

$$v = \frac{c_v k_v d^{z_v}}{T_n^m s^{r_v}}. \quad (6.4)$$

Следовательно, формулы (6.1) – (6.4) представляют собой ММ расчета скорости резания на различных уровнях абстрагирования.

Функциональные ММ предназначены для отображения физических или информационных процессов, протекающих в технологических системах при их функционировании. Обычно функциональные ММ представляют системой уравнений, описывающих фазовые переменные, внутренние, внешние и выходные параметры.

При рассмотрении иерархических уровней ММ будут представлять

собой модели на микроуровне, макроуровне и метауровне. Особенностью ММ на микроуровне является отображение физических процессов в непрерывном пространстве и времени. С помощью дифференциальных уравнений в частных производных рассчитывают поля механических напряжений и деформаций.

На макроуровне используют укрупненную дискретизацию пространства по функциональному признаку, что приводит к представлению ММ на этом уровне в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. В этих моделях присутствует две группы переменных — независимых (время) и зависимых (фазовых). Такими переменными являются силы и скорость перемещения в механических системах, напряжение и сила тока в электрических системах и т. п.

Математические модели на метауровне описывают укрупненно рассматриваемые объекты (технологические системы и т. п.). В качестве математического аппарата используют обыкновенные дифференциальные уравнения, теорию массового обслуживания, элементы дискретной математики (сети Петри и т. д.).

Теоретические модели строят на основании изучения закономерностей. В отличие от формальных моделей (например, эмпирических, описывающих режимы резания) они в большинстве случаев более универсальны и справедливы для широких диапазонов изменения технологических параметров. Теоретические модели бывают линейные и нелинейные, а в зависимости от мощности множества значений переменных — непрерывные и дискретные. При технологическом проектировании наиболее распространены дискретные модели, переменными которых являются дискретные величины, а множество решений счетно. Различают также модели динамические и статические. В большинстве случаев проектирования технологических процессов используют статические модели, уравнения которых не учитывают инерционность процессов в объекте.

В полной ММ учитывают связи всех элементов проектируемого объекта, например маршрутную технологию. МакроММ отображает значительно меньшее число межэлементных связей. Аналитические ММ представляют собой функциональные модели (теоретические или эмпирические) и, как правило, их используют при параметрической оптимизации ТП. Алгоритмическая ММ представляется в виде алгоритма. Имитационная модель является алгоритмической, отражающей поведение исследуемого объекта во времени при заданных внешних воздействиях на объект (например, процесс подготовки управляющих программ для роботизированной сборки).

Выбор типа ММ, наиболее эффективный в условиях конкретной задачи, определяется ее технологической сущностью, формой представ-

ления исходной технологической информации, общей целью исследования. Функциональная ММ в общем случае имеет вид:

$$F = F(x, y),$$

где F — ожидаемая эффективность; x — управляемые переменные; y — неуправляемые переменные.

Ограничения, входящие в модель, имеют вид $\varphi(x, y) = 0$. Решения на модели получаются путем определения значения x (как функции от y), максимизирующего (минимизирующего) F .

В зависимости от сложности задачи используют различные принципы построения моделей. Зачастую возникает необходимость разработки менее точной модели, но тем не менее более полезной для практики. Возникают две задачи: с одной стороны, нужно разработать модель, на которой проще всего получать численное решение, а с другой — обеспечить максимально возможную точность модели. С целью упрощения модели используются такие приемы, как исключение переменных, изменение характера переменных, изменение функциональных соотношений между переменными (например, линейная аппроксимация), изменение ограничений (их модификация, постепенный ввод ограничений в условие задачи). Модели, являясь эффективным средством исследования структуры задачи, позволяют обнаружить принципиально новые стратегии.

Методика получения ММ элементов

В общем случае процедура получения ММ элементов включает в себя следующие операции:

1. Выбор свойств объекта, которые подлежат отражению в модели. Этот выбор основан на анализе возможных применений модели и определяет степень универсальности ММ.

2. Сбор исходной информации о выбранных свойствах объекта. Источниками сведений могут быть опыт и знания инженера, разрабатывающего модель, научно-техническая литература, прежде всего справочная, описания прототипов — имеющихся ММ для элементов, близких по своим свойствам к исследуемому, результаты экспериментального измерения параметров и т. п.

3. Синтез структуры ММ. *Структура ММ* — общий вид математических соотношений модели без конкретизации числовых значений фигурирующих в них параметров. Структуру модели можно представить также в графической форме, например в виде эквивалентной схемы или графа. *Синтез структуры* — наиболее ответственная и с наибольшим трудом поддающаяся формализации операция.

4. Расчет числовых значений параметров ММ. Эта задача ставится как задача минимизации погрешности модели заданной структуры.

5. Оценка точности и адекватности ММ. Для оценки точности должны использоваться значения $y_{\text{ист}}$, которые не фигурировали при решении задачи.

Реализация функциональных ММ на ЭВМ подразумевает выбор численного метода решения уравнений и преобразование уравнений в соответствии с особенностями выбранного метода. Конечная цель преобразований — получение рабочей программы анализа в виде последовательности элементарных действий (арифметических и логических операций), реализуемых командами ЭВМ. Все указанные преобразования исходной ММ в последовательность элементарных действий ЭВМ выполняет автоматически по специальным программам, создаваемым инженером — разработчиком САПР. Инженер — пользователь САПР должен лишь указать, какие программы из имеющихся он хочет использовать. Процесс преобразований ММ, относящихся к различным иерархическим уровням, иллюстрирует рис. 6.1.

Инженер-пользователь задает исходную информацию об анализируемом объекте и о проектных процедурах, подлежащих выполнению, на удобном для него проблемно-ориентированном языке программного комплекса. Ветвь 1 на рис. 6.1 соответствует постановке задачи, относящейся к микроуровню, как краевой, чаще всего в виде ДУЧП. Численные методы решения ДУЧП основаны на дискретизации переменных и алгебраизации задачи. Дискретизация переменных заключается в за-

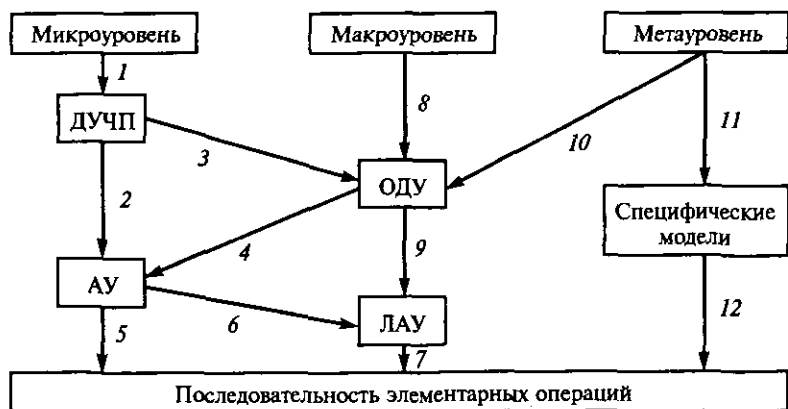


Рис. 6.1. Процесс преобразования ММ:

ДУЧП — дифференциальные уравнения с частными производными; ОДУ — обыкновенные дифференциальные уравнения; АУ — алгебраические уравнения; ЛАУ — линейные алгебраические уравнения; 1—12 — взаимонаправленные пути дискретизации переменных в ММ

мене непрерывных переменных конечным множеством их значений в заданных для исследования пространственном и временном интервалах; алгебраизация — в замене производных алгебраическими соотношениями.

6.2. Структурные модели

Структурные или структурно-логические модели согласно государственному стандарту подразделяют на табличные, сетевые и перестановочные, которые определяются строками булевой матрицы:

$$[S_i \times F(S)] = \begin{bmatrix} F_G & F_n & F_\lambda & F_a \\ 1 & 1 & 1 & 1 & S_1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & S_2 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & S_3 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & S_4 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & S_5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & S_6 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & S_7 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & S_8 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & S_9 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & S_{10} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & S_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{12} \end{bmatrix}, \quad (6.5)$$

где S_i — свойства моделей, влияющих на содержание проектирования; $F(S)$ — набор свойств; F_G — набор свойств, если все графы объектов A_k , проектируемых по данной модели, представляют собой простые пути или цепи $F_G = 1$ и $F_G = 0$ в противном случае; F_n — набор свойств, учитывающих число элементов во всех вариантах объектов A_k ($F_n = 1$ — число элементов a_i одинаково, $F_n = 0$ — в противном случае); F_λ — набор свойств, учитывающих отношения между любыми элементами объекта $a_i, a_j \in A_k$ во всех вариантах объектов A_k ($F_\lambda = 1$ — отношение не меняется, $F_\lambda = 0$ — в противном случае); F_a — набор свойств, учитывающих состав элементов a_i в A_k ($F_a = 1$ — состав одинаков, $F_a = 0$ — в противном случае).

В матрице (6.5) модели класса S_1 называют табличными. В табличной модели каждому набору свойств $F(A_k)$ соответствует единственный вариант проектируемого объекта A_k , поэтому табличные модели ис-

пользуют для поиска стандартных, типовых или готовых проектных решений. Модели остальных классов применяют для получения типовых унифицированных и индивидуальных проектных решений при наличии их вариантов и необходимости оптимизации решения. Модели классов S_2, S_3, S_7, S_8 и S_{11} называют сетевыми. Структура элементов сетевой модели описывается ориентированным графом, не имеющим ориентированных циклов. В этой модели может содержаться несколько вариантов проектируемого объекта A_k , однако во всех вариантах сохраняется неизменным соотношение порядка между входящими элементами. Модели классов $S_3, S_4, S_6, S_9, S_{10}$ и S_{12} называют перестановочными. Соотношение порядка между элементами проектируемого объекта A_k в перестановочных объектах обычно задается с помощью графа, содержащего ориентировочные циклы, причем все варианты объектов A_k , проектируемые по перестановочным моделям, различаются порядком между элементами, входящими в них.

Объектом проектирования A_k может быть ТП, операция или технологический переход.

Если в качестве объекта проектирования рассматривать ТП, то операции будут элементами. При проектировании операции элементами являются технологические переходы.

Если проектируемый объект A_k должен содержать фиксированный набор элементов $a_i \in A_k$, то

$$A_k = a_1 \wedge a_2 \wedge, \dots, \wedge a_i \wedge, \dots, \wedge a_n = \bigwedge_{i=1}^n a_i;$$

если A_k может содержать любой элемент $a_i \in A_k$, то

$$A_k = a_1 \vee a_2 \vee, \dots, \vee a_i \vee, \dots, \vee a_n = \bigvee_{i=1}^n a_i;$$

а если какой-либо единственный элемент $a_i \in A_k$, то

$$A_k = a_1 \nabla a_2 \nabla, \dots, \nabla a_i \nabla, \dots, \nabla a_n = \bigtriangledown_{i=1}^n a_i.$$

На рис. 6.2 приведены табличная, сетевая и перестановочная модели.

При обработке группы деталей (рис. 6.2, а) на токарном прутковом автомате с помощью табличной модели устанавливают последовательность обработки поверхностей. Каждая деталь имеет поверхности $F_1, F_2, \dots, F_8$ с определенными свойствами, поэтому состав свойств поверхностей, относящихся к группе деталей, будет

$$F(A) = (F_1 \wedge F_2 \wedge F_4 \wedge F_8) \vee F_3 \vee F_5 \vee F_6 \vee F_7.$$

Если рассматривать совокупность свойств более высокого уровня:

$$F'_1 = \{F_1, F_2, F_4, F_8\},$$

то получим

$$F'(A) = F'_1 \vee F_3 \vee F_5 \vee F_6 \vee F_7, \quad (6.6)$$

а если совокупности свойств для деталей 1-, 2- и 3-й групп (соответственно элементам a_1, a_2, a_3 группы A деталей, т. е. $a_1, a_2, a_3 \in A$)

$$F''_1 = F(a_1) = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8\};$$

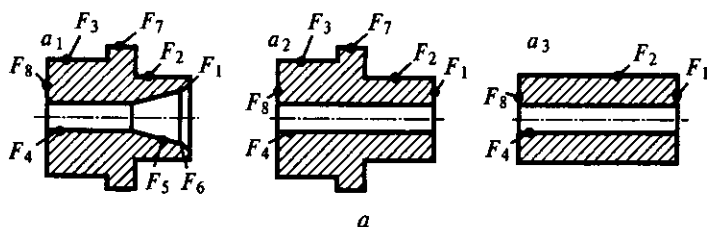
$$F''_2 = F(a_2) = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_7, F_8\};$$

$$F''_3 = F(a_3) = \{F_1, F_2, F_4, F_8\},$$

то получим

$$F''(A) = F''_1 \nabla F''_2 \nabla F''_3. \quad (6.7)$$

Табличные модели представляют собой матрицы (см. рис. 6.2, б и в), в которых $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_8$ — операторы (технологические переходы при выполнении автоматной операции).



а

	F_i							
τ_i	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
τ_1	1							
τ_2		1						
τ_3			1					
τ_4				1				
τ_5					1			
τ_6						1		
τ_7							1	
τ_8								1

б

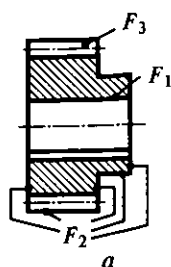
	F'_i		
τ_i	F'_1	F'_2	F'_3
τ_1	1	1	1
τ_2	1	1	1
τ_3	1	1	
τ_4	1	1	1
τ_5	1		
τ_6	1		
τ_7	1	1	
τ_8	1	1	1

в

Рис. 6.2. Табличные модели проектирования маршрута обработки поверхностей на прутковом автомате:

a — группа деталей; б, в — матрицы; τ_i — операторы (технологические переходы); τ_1 — подрезка торцов; τ_2, τ_3, τ_4 — обтачивание поверхностей; τ_5 — сверление отверстия; τ_6 — зенкерование; τ_7 — растачивание фаски; τ_8 — отрезка

Сетевая модель включает матрицу свойств детали, описание логических отношений между свойствами и граф $G = (T, C)$ взаимосвязи операторов ($T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$; $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ — дуги графа) по возможной последовательности их использования. Например, в логической



	F_i		
τ_i	F_1	F_2	F_3
τ_1	I	I	I
τ_2	I		
τ_3		I	
τ_4		I	
τ_5			I
τ_6			I
τ_7	I	I	I
τ_8	I		
τ_9			I
τ_{10}			I
τ_{11}	I	I	I
τ_{12}	I	I	I

б



в

Рис. 6.3. Сетевая модель операторов (операций) технологического маршрута изготовления зубчатого колеса:

a — зубчатое колесо; b — матрица операторов τ_i (операций); $в$ — взаимосвязи операторов (операций); τ_1 — штамповка заготовки; τ_2 — протягивание отверстия и шпоночного паза; τ_3 — черновое обтачивание зубчатого колеса; τ_4 — чистовое обтачивание зубчатого колеса; τ_5 — нарезание зубчатого профиля; τ_6 — шевингование зубчатого профиля; τ_7 — термическая обработка; τ_8 — отделка базового отверстия; τ_9 — шлифование зубчатого профиля; τ_{10} — притирка зубчатого профиля; τ_{11} — мойка; τ_{12} — контроль



Рис. 6.4. Граф перестановочной модели расцеховки при изготовлении изделия:

операторы (цехи): p_1 — литейный; p_2 — кузнечный; p_3 — механический; p_4 — термический; p_5 — сборочный; p_6 — лакокрасочный; p_7 — испытания и упаковки

сетевой модели класса $S_5(T)$ при изготовлении зубчатого колеса смежность и порядок операторов (операций) заданы графом (рис. 6.3).

Проектирование ТП изготовления изделия характеризуется различными уровнями: самый высокий уровень — разработка принципиальной схемы ТП, который включает отдельные этапы, причем этап может содержать несколько операций или одну операцию. В данном случае оператором будет являться этап ТП. Моделирование ТП разного уровня проводят с помощью моделей $S_i(T)$. При этом операторам модели $S_i(T)$ более высокого уровня — этапам ТП соответствуют операции и переходы, входящие соответственно в маршрут и операцию, проектируемые по моделям $S_j(T)$ более низкого уровня.

На рис. 6.4 приведен граф перестановочной модели класса $S_6(T)$ расцеховки при изготовлении изделия.

6.3. Математические модели на различных иерархических уровнях

Математические модели на микроуровне

Данные модели связаны с исследованием напряженного состояния деталей конструкции и связанные с ним расчеты на прочность.

Напряженное состояние деталей конструкции в зависимости от геометрии исследуемого узла, вида приложенной нагрузки и свойств материала описывается дифференциальными уравнениями различного вида. Любое из этих уравнений можно получить из общего квазигармонического уравнения

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + Q = 0, \quad (6.8)$$

Здесь x, y, z — пространственные координаты; φ — искомая непрерывная функция; K_x, K_y, K_z — коэффициенты; Q — внешнее воздействие.

В двухмерном случае при $K_x = K_y = 1$ уравнение (6.8) сводится к уравнению, описывающему напряженное состояние, возникающее в поперечном сечении упругого однородного стержня под воздействием крутящего момента M :

$$\partial^2 \varphi / \partial x^2 + \partial^2 \varphi / \partial y^2 + 2E\theta = 0, \quad (6.9)$$

где E — модуль сдвига материала стержня; θ — угол закручивания на единицу длины; φ — функция, связанная с напряжениями сдвига τ_x и τ_y уравнениями

$$\tau_x = \partial \varphi / \partial y; \quad \tau_y = \partial \varphi / \partial x. \quad (6.10)$$

В (6.9) в явном виде не входит крутящий момент, связанный с искомой функцией напряжения φ уравнением

$$M = 2 \int_S \varphi dS,$$

где S — площадь рассматриваемого сечения.

Точное решение краевых задач получают только в частных случаях. Поэтому реализация таких моделей заключается в использовании различных приближенных моделей. В настоящее время наиболее широкое распространение получили модели на основе интегральных уравнений и модели на основе метода сеток.

Одним из наиболее популярных методов решения краевых задач в САПР является метод конечных элементов.

Большинство технических подсистем характеризуют с помощью фазовых переменных. Фазовые переменные образуют вектор неизвестных в ММ технической системы. Для каждой физической подсистемы характерны свои законы, однако для простейших элементов форма выражающих их уравнений оказывается одинаковой. Ниже в качестве примера приводятся электрическая и механическая подсистемы.

Электрическая подсистема. Фазовыми переменными электрической подсистемы являются токи I и напряжения U . Запишем уравнения трех типов простейших элементов:

- а) уравнение сопротивления (закон Ома) $I = U/R$, где R — электрическое сопротивление;
- б) уравнение емкости $I = C(dU/dt)$, где C — электрическая емкость;
- в) уравнение индуктивности $U = L(dI/dt)$, где L — электрическая индуктивность.

Механическая поступательная система. Фазовые переменные механической поступательной подсистемы — силы F и скорости V — соответственно аналоги токов и напряжений. Запишем уравнения трех типов простейших элементов:

- а) уравнение вязкого трения $F = V/R_v$, где $R_v = 1/k$ — аналог электрического сопротивления; k — коэффициент вязкого трения;
- б) уравнение массы (уравнение второго закона Ньютона) $F = ma = C_m(dV/dt)$, где $a = dV/dt$ — ускорение $C_m = m$ — аналог электрической емкости (масса элемента);
- в) уравнение пружины $F = kx$, где x — перемещение; k — жесткость пружины.

Продифференцируем обе части уравнения по времени: $dF/dt = kV$, или $V = L_m(dF/dt)$, где $L_m = 1/k$ — аналог электрической индуктивности.

Аналогичное компонентное уравнение можно получить из закона Гука для элемента, у которого учитывается сжимаемость, т. е. $P = E(\Delta l/l)$, где P — напряжение в элементе; E — модуль Юнга; l — длина элемента; Δl — изменение длины элемента. Умножив обе части этого уравнения на площадь S поперечного сечения элемента и продифференцировав по времени, получим: $d(PS)/dt = (ES/l)(d\Delta l/dt)$; $d(\Delta l)/dt = V$; $PS = F$; $dF/dt = (ES/l)V$, или $V = L_m(dF/dt)$; $L_m = l/(ES)$.

Механическая вращательная подсистема. Фазовые переменные этой подсистемы — моменты сил M и угловые скорости ω — соответственно аналоги токов и напряжений. Запишем уравнения трех типов простейших элементов:

- а) уравнение вязкого трения вращения $M = \omega/R_{vp}$, где $R_{vp} = 1/k$ — аналог электрического сопротивления; k — коэффициент трения вращения;

б) основное уравнение динамики вращательного движения $M = J(d\omega/dt)$, где J — аналог электрической емкости (момент инерции элемента);

в) уравнение кручения бруса с круглым поперечным сечением $M = GJ_p\theta$, где M — крутящий момент; G — модуль сдвига; J_p — полярный момент инерции сечения; $\theta = d\varphi/dl$ — относительный угол закручивания.

Рассмотрим брус конечной длины, тогда $\theta = \varphi/l$, где φ — угол закручивания; l — длина бруса. Продифференцируем обе части уравнения по времени, т. е. $dM/dt = (GJ_p/l)(d\varphi/dt)$, или, если учесть, что $d\varphi/dt = \omega$ и $L_{\text{вп}} = l/(GJ_p)$, то $\omega = L_{\text{вп}}(dM/dt)$, где $L_{\text{вп}}$ — аналог электрической индуктивности (вращательная гибкость).

Аналогичное компонентное уравнение можно получить для спиральной пружины, уравнение которой $M = c\varphi$, где c — жесткость пружины. Продифференцировав обе части уравнения по времени, получим $\omega = L_{\text{вп}}(dM/dt)$; $L_{\text{вп}} = 1/c$.

Математические модели на метауровне

Математические модели на метауровне в технологических системах представляют большое разнообразие. В качестве иллюстрации ниже приводятся ММ.

Математические модели с использованием целочисленного программирования. Для создания технологических структур из РТК необходимо приобрести n РТК для участка. Для этого выделен фонд в сумме N рубл. Стоимость РТК j -го типа составляет C_j , а производительность a_j , $j = \overline{1, n}$. Требуется выбрать РТК, обеспечивающие максимальную суммарную производительность в пределах установленного денежного лимита N .

Математическая модель имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \sum_{j=1}^n a_j x_j; \\ \sum C_j x_j \leq N; \\ x_j = \begin{cases} 1, \text{ если приобретается РТК;} \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases} \end{array} \right.$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; $a_j \geq 0$; $C_j \geq 0$; $N > 0$ — целые числа.

Рассмотрим решение методом ветвей и границ.

Если отбросить требования целочисленности, то переменные a_j , C_j будут изменяться непрерывно на отрезке $[0, 1]$. Решением такой непрерывной задачи будет верхней границей (так как определяется макси-

мум) множества значений целевой функции на соответствующем подмножестве решения.

Алгоритм решения непрерывной задачи состоит в следующем. Упорядочим коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_n$ в порядке убывания величин $\lambda_j = a_j / C_j$ и соответственно этому порядку нумеруем переменные и параметры задачи.

Процедура разбиения (методом ветвей и границ) допустимого множества G , задаваемого ограничениями, заключается в следующем. Разобьем G на два подмножества G_1 и G_2 . Первому подмножеству принадлежат все решения с $x_1 = 1$, а второму с $x_1 = 0$. Далее каждое из подмножеств G_1 и G_2 опять разбиваем на два: в первом $x_1 = 1$, во втором $x_1 = 0$ и т.д.

На каждом шаге очередного разбиения выбирают подмножество, которому соответствует максимальное значение оценки. Поиск решения заканчивают, если на некотором шаге получают допустимое решение значения целевой функции, на котором шаг будет наибольшим по сравнению с оценками для всех подмножеств — кандидатов на разбиение.

Рассмотрим численный пример. Пусть целевая функция и ограничение имеют следующий вид:

$$f(x) = (6x_1 + 8x_2 + 10x_3 + 11x_4 + 9x_5) \rightarrow \max, \\ 2x_1 + 3x_2 + 7x_3 + 10x_4 + 9x_5 \leq 20.$$

В данной задаче $A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) = (6, 8, 10, 11, 9);$
 $C = (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) = (2, 3, 7, 10, 9);$
 $N = 20.$

Предлагается пять типов РТК, т. е. $n = 5$. Схема решения (схема разбиения) методом ветвей и границ показана на рис. 6.5.

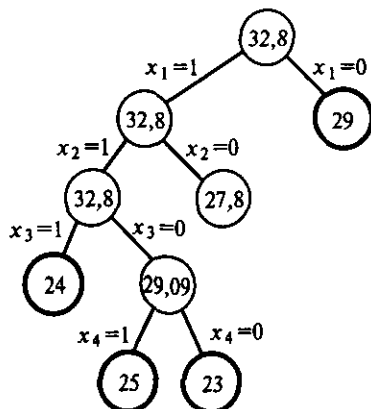


Рис. 6.5. Схема решения задачи методом ветвей и границ

При $x_1 = 1$ получим $f(x) = 32,8$. Имеем верхнюю оценку, для $x_2, \dots, x_5$ отказываемся от целочисленности, изменяя x_j ($j = 2, 3, 4, 5$) на отрезке $[0, 1]$ непрерывно. При $x_1 = 0$ соответственно $f(x) = 29$, причем решение непрерывной задачи $x_1 = 0, x_2 = x_3 = x_4 = 1, x_5 = 0$ является целочисленным (на рис. 6.5 такие подмножества отмечены двойными кружками).

Выбираем подмножество $x_1 = 1$. При $x_2 = 1$ получим $f(x) = 32,8$, а при $x_2 = 0 - f(x) = 27,8$. Выбираем $x_1 = 1, x_2 = 1$. При $x_3 = 1$ все остальные x_j

($j = \overline{4, 5}$) должны быть нулями, так как в противном случае нарушится ограничение. При $x_3 = 0$ находим $f(x) = 29,09$. В итоге получаем либо $x_4 = 1, x_5 = 0, [f(x) = 25]$, что меньше 29. Поэтому допустимое решение, полученное на первом шаге, т. е. $x_1 = 0, x_2 = x_3 = x_4 = 1, x_5 = 0, [f(x) = 29]$, является оптимальным.

Математические модели с использованием систем массового обслуживания. Эти системы основаны на марковском случайном процессе. Физическая система S с течением времени меняет свое состояние (переходит из одного состояния в другое) случайным образом. При этом в системе S протекает случайный процесс, который называется марковским, если для любого момента времени t_0 вероятностные характеристики процесса в «будущем» зависят только от его состояния в данный момент времени t_0 и не зависят от того, когда и как система пришла в это состояние. Вероятностные характеристики в «будущем» можно найти (например, вероятность того, что через некоторое время τ система S окажется в состоянии S_1 или сохранит состояние S_0 и т.п.). Таким образом в марковском случайном процессе «будущее» зависит от «прошлого» только через «настоящее».

Рассматривая марковские процессы с дискретными состояниями и непрерывным временем, нам удобно будет представлять себе, что все переходы системы S из состояния в состояние происходят под действием каких-то потоков событий (поток вызовов, поток отказов, поток восстановлений и т.д.). Если все потоки событий, переводящие систему S из состояния в состояние, — простейшие, то процесс, протекающий в системе, будет марковским. Это и естественно, так как простейший поток не обладает последствием: в нем «будущее» не зависит от «прошлого».

Если система S находится в каком-то состоянии S_i , из которого есть непосредственный переход в другое состояние S_j (стрелка, ведущая из S_i в S_j на графе состояний), то мы это будем представлять так, как будто на систему, пока оно находится в состоянии S_i , действует простейший поток событий, приводящий ее по стрелке $S_i \rightarrow S_j$. Как только появится первое событие этого потока, происходит «перескок» системы из S_i в S_j .

Для наглядности очень удобно представлять граф состояний.

Построим размеченный граф состояний для технического устройства из двух узлов. Состояния системы: S_0 — оба узла исправны; S_1 — первый узел ремонтируется, второй исправен; S_2 — второй узел ремонтируется, первый исправен; S_3 — оба узла ремонтируются.

Интенсивность потоков событий, переводящих систему из состояния в состояние, будем вычислять, предполагая, что среднее время ремонта узла не зависит от того, ремонтируется ли один узел или оба сразу. Это будет именно так, если ремонтом каждого узла занят от-

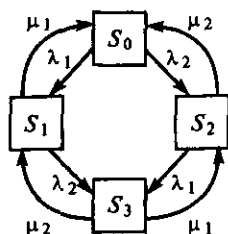


Рис. 6.6. Граф состояний

дельный специалист. Найдем все интенсивности потоков событий, переводящих систему из состояния в состояние. Пусть система находится в состоянии S_0 . Какой поток событий переводит ее в состояние S_1 ? Очевидно, поток отказов первого узла. Его интенсивность λ_1 равна единице, деленной на среднее время безотказной работы первого узла. Какой поток событий переводит систему обратно из S_1 в S_0 ? Очевидно, поток «окончаний ремонтов» первого узла. Его интенсивность μ_1 равна единице, деленной на среднее время ремонта первого узла. Аналогично вычисляют интенсивности потоков событий, переводящих систему по всем стрелкам графа, представленного рис. 6.6.

Имея в своем распоряжении размеченный граф состояний системы, легко построить ММ данного процесса.

В самом деле, пусть рассматривается система S , имеющая n возможных состояний $S_1, S_2, \dots, S_n$. Назовем *вероятностью i -го состояния* вероятность $p_i(t)$ того, что в момент t система будет находиться в состоянии S_i . Очевидно, что для любого момента сумма всех вероятностей состояний равна единице:

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1. \quad (6.11)$$

Имея в своем распоряжении размеченный граф состояний, можно найти все вероятности состояний $p_i(t)$ как функции времени. Для этого составляют и решают так называемые *уравнения Колмогорова* — дифференциальные уравнения особого вида, в которых неизвестными функциями являются вероятности состояний:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_0}{dt} &= \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2 - (\lambda_1 + \lambda_2) p_0; \\ \frac{dp_1}{dt} &= \lambda_1 p_0 + \mu_2 p_3 - (\lambda_2 + \mu_1) p_1; \\ \frac{dp_2}{dt} &= \lambda_2 p_0 + \mu_1 p_3 - (\lambda_1 + \mu_2) p_2; \\ \frac{dp_3}{dt} &= \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2 - (\mu_1 + \mu_2) p_3. \end{aligned} \right\} \quad (6.12.)$$

Чтобы решить уравнения Колмогорова и найти вероятности состояний, прежде всего надо задать начальные условия. Если мы точно зна-

ем начальное состояние системы S_i , то в начальный момент (при $t = 0$) $p_i(0) = 1$, а все остальные начальные вероятности равны нулю. Так, например, уравнения (6.12), естественно, надо решать при начальных условиях $p_0(0) = 1, p_1(0) = p_2(0) = p_3(0) = 0$ (в начальный момент оба узла исправны).

Если вероятности $p_1, p_2, \dots$ постоянны, то их производные равны нулю. Значит, чтобы найти финальные вероятности, нужно все левые части в уравнениях Колмогорова положить равными нулю и решить полученную систему уже не дифференциальных, а линейных алгебраических уравнений. Можно и не писать уравнений Колмогорова, а прямо по графу состояний составить систему линейных алгебраических уравнений. Если перенести отрицательный член каждого уравнения из правой части в левую, то получим систему уравнений, в которой в левой части стоит финальная вероятность данного состояния p_i , умноженная на суммарную интенсивность всех потоков, ведущих из данного состояния, а справа — сумма произведений интенсивностей всех потоков, входящих в i -е состояние, на вероятности тех состояний, из которых эти потоки исходят.

Руководствуясь этим правилом, запишем линейные алгебраические уравнения для финальных вероятностей состояний системы, граф состояний которой приведен на рис. 6.6:

$$\left. \begin{aligned} (\lambda_1 + \lambda_2)p_0 &= \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2; \\ (\lambda_2 + \mu_1)p_1 &= \lambda_1 p_0 + \mu_2 p_3; \\ (\lambda_1 + \mu_2)p_2 &= \lambda_2 p_0 + \mu_1 p_3; \\ (\mu_1 + \mu_2)p_3 &= \lambda_2 p_1 + \lambda_1 p_2. \end{aligned} \right\} \quad (6.13)$$

Нормировочное условие для системы (6.13)

$$p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1. \quad (6.14)$$

Процесс работы системы массового обслуживания (СМО) представляет собой случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем; состояние СМО изменяется скачком в моменты появления каких-то событий (или прихода новой заявки, или окончания обслуживания, или момента, когда заявка, которой надоело ждать, покидает очередь).

Предметом теории массового обслуживания является построение ММ, связывающих заданные условия работы СМО (число каналов, их производительность, правила работы, характер потока заявок) с интересующими нас характеристиками — показателями эффективности СМО, описывающими с той или другой точки зрения ее способность справляться с потоком заявок. В качестве таких показателей (в зависи-

мости от обстановки и целей исследования) используют разные величины, например: среднее число заявок, обслуживаемых СМО в единицу времени; среднее число занятых каналов; среднее число заявок в очереди и среднее время ожидания обслуживания; вероятность того, что число заявок в очереди превысит какое-то значение, и т. д. Среди заданных условий работы СМО мы намеренно не выделяем элементов решения: ими могут быть, например, число каналов, их производительность, режим работы СМО и т. п.

Ниже в качестве примера приведена простейшая СМО: n -канальная СМО с отказами. Задача ставится следующим образом: имеется n каналов, на которые поступает поток заявок с интенсивностью λ . Поток обслуживаний имеет интенсивность μ (величина, обратная среднему времени обслуживания $\bar{t}_{об}$). Для нахождения параметров функционирования СМО определяют:

A — абсолютную пропускную способность (среднее число заявок, обслуживаемых в единицу времени);

Q — относительную пропускную способность (среднюю долю пришедших заявок, обслуживаемых системой);

$P_{отк}$ — вероятность отказа (вероятность того, что заявка покинет СМО необслуженной);

$\bar{k}$ — среднее число занятых каналов.

Решение. Состояние системы S (СМО) будем нумеровать по числу заявок, находящихся в системе (в данном случае оно совпадает с числом занятых каналов):

S_0 — в СМО нет ни одной заявки;

S_1 — в СМО находится одна заявка (один канал занят, остальные свободны);

S_k — в СМО находится k заявок (k каналов заняты, остальные свободны);

S_n — в СМО находится n заявок (все n каналов заняты).

Граф состояний СМО соответствует схеме гибели и размножения (рис. 6.7). Разметим этот граф — проставим у стрелок интенсивности потоков событий. Из S_0 в S_1 систему переводит поток заявок с интенсивностью λ (как только приходит заявка, система перескакивает из S_0 в S_1). Тот же поток заявок переводит систему из любого левого состояния в соседнее правое (см. верхние стрелки на рис. 6.7).

Проставим интенсивности у нижних стрелок. Пусть система находится в состоянии S_1 (работает один канал). Он производит μ обслуживаний в единицу времени. Проставляем у стрелки $S_1 \rightarrow S_0$ интенсивность μ . Теперь представим себе, что система находится в состоянии S_2 (работают два канала). Чтобы ей перейти в S_1 , нужно, чтобы либо закончил

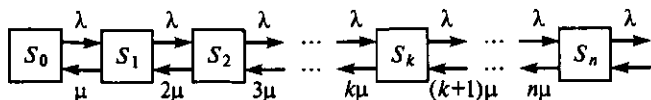


Рис. 6.7. Граф состояния СМО

обслуживание первый канал, либо второй; суммарная интенсивность их потоков обслуживаний равна 2μ ; проставляем ее у соответствующей стрелки. Суммарный поток обслуживаний, даваемый тремя каналами, имеет интенсивность 3μ , k каналами — $k\mu$. Проставляем эти интенсивности у нижних стрелок на рис. 6.7.

Теперь, зная все интенсивности, воспользуемся уже готовыми формулами (6.13) для финальных вероятностей в схеме гибели и размножения. По формуле (6.14) получим

$$p_0 = \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda^2}{2\mu^2} + \frac{\lambda^3}{2 \cdot 3\mu^3} + \dots + \frac{\lambda^k}{k!\mu^k} + \dots + \frac{\lambda^n}{n!\mu^n} \right)^{-1}. \quad (6.15)$$

Члены разложения $\frac{\lambda}{\mu}, \frac{\lambda^2}{2\mu^2}, \dots, \frac{\lambda^n}{n!\mu^n}$ представляют собой коэффициенты при p_0 в выражениях для $p_1, p_2, \dots, p_n$:

$$p_1 = \frac{\lambda}{\mu} p_0, \quad p_2 = \frac{\lambda^2}{2\mu^2} p_0, \quad \dots, \quad p_k = \frac{\lambda^k}{k!\mu^k} p_0, \quad \dots, \quad p_n = \frac{\lambda^n}{n!\mu^n} p_0. \quad (6.16)$$

Заметим, что в формулы (6.15), (6.16) интенсивности λ и μ входят не по отдельности, а только в виде отношения λ/μ . Обозначим

$$\rho = \lambda/\mu \quad (6.17)$$

и будем называть величину ρ «приведенной интенсивностью потока заявок», которая представляет собой среднее число заявок, приходящее за среднее время обслуживания одной заявки. Пользуясь этим обозначением, перепишем формулы (6.15) и (6.16):

$$p_0 = \left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^k}{k!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} \right)^{-1},$$

$$p_1 = \rho p_0, \quad p_2 = \frac{\rho^2}{2!} p_0, \quad \dots, \quad p_k = \frac{\rho^k}{k!} p_0, \quad \dots, \quad p_n = \frac{\rho^n}{n!} p_0. \quad (6.18)$$

Таким образом, финальные вероятности определены. По ним вычислим характеристики эффективности СМО. Сначала найдем $P_{\text{отк}}$ — вероятность того, что пришедшая заявка получит отказ (не будет обслужена). Для этого нужно, чтобы все n каналов были заняты, значит,

$$P_{\text{отк}} = p_n = \frac{\rho^n}{n!} p_0. \quad (6.19)$$

Отсюда находим относительную пропускную способность — вероятность того, что заявка будет обслужена:

$$Q = 1 - P_{\text{отк}} = 1 - \frac{\rho^n}{n!} p_0. \quad (6.20)$$

Абсолютную пропускную способность получим, умножая интенсивность потока заявок λ на Q :

$$A = \lambda Q = \lambda \left(1 - \frac{\rho^n}{n!} p_0 \right).$$

Каждый занятый канал в единицу времени обслуживает в среднем μ заявок. Значит, среднее число занятых каналов равно

$$\bar{k} = A / \mu, \quad (6.21)$$

или, учитывая значение A ,

$$\bar{k} = \rho \left(1 - \frac{\rho^n}{n!} p_0 \right). \quad (6.22)$$

Приведенные выше положения используют, например, при выборе компоновочного решения РТК и при обслуживании группы станков одним или несколькими роботами. Это дает также возможность выполнить функции транспортирования. При многостаночном обслуживании создаются условия для потерь времени или ожидания станком обслуживания, если одновременно на нескольких позициях возникает потребность в новых заготовках.

Характерность эффективности обслуживания группы станков роботом (роботами) определяют по формулам (6.18) – (6.22).

Математические модели с использованием сетей Петри. Сети Петри являются эффективным инструментом дискретных процессов, в частности, функционирования станочных систем. Их особенность заключается в возможности отображения параллелизма, асинхронности и иерархичности.

На рис. 6.8 приведена сеть Петри, где P — конечное непустое мно-

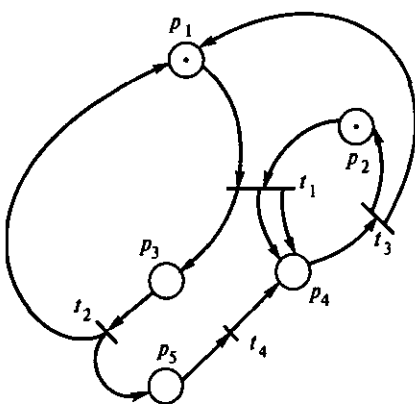


Рис. 6.8. Сеть Петри

жество позиций (состояний); T — конечное непустое множество переходов (событий), причем $p \in P$ и $t \in T$; $F: P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$; $H: T \times P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ — функции входных и выходных инциденций; $\mu_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ — начальная маркировка. Вершины сети $p \in P$ изображены кружками, а вершины $t \in T$ — черточками (барьерами). Дуги соответствуют функциям инцидентности позиций и переходов. Точки в кружочках означают заданную начальную маркировку. Число маркеров в позиции равно значению функции $\mu: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$. Переход от одной маркировки к другой осуществляется срабатыванием переходов. Переход t может сработать при маркировке μ , если он является возбужденным:

$$\mu(p) - F(p, t) \geq 0, \quad \forall p \in P. \quad (6.23)$$

Данное условие показывает, что в каждой входной позиции перехода t число маркеров не меньше веса дуги, соединяющей эту позицию с переходом. В результате срабатывания перехода t , удовлетворяющего условию (6.23), маркировку μ заменяют маркировкой μ' по следующему правилу:

$$\mu'(p) = \mu(p) - F(p, t) + H(t, p), \quad \forall p \in P. \quad (6.24)$$

По этому правилу в результате срабатывания из всех входных позиций перехода t изымается $F(p, t)$ маркеров и в каждую выходную позицию добавляется $H(t, p)$ маркеров. Данное положение означает, что маркировка μ' непосредственно достижима из маркировки μ . Функционирование сети Петри состоит в последовательной смене маркировок в результате срабатывания возбужденных переходов.

Состояние сети в данный момент времени определяется ее текущей маркировкой. Важной характеристикой сети Петри является граф достижимости, с его помощью описываются возможные варианты функци-

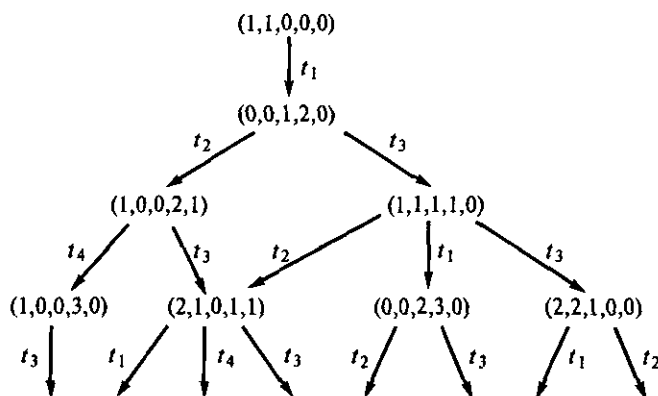


Рис. 6.9. Фрагмент графа достижимости сети Петри

онирования сети. Такой граф имеет вершины, которые являются возможными маркировками. Маркировки μ и μ' соединяются в направлении t дугой, помеченной символами перехода $t \in T$ или $\mu \xrightarrow{t} \mu'$. Маркировка μ' является достижимой из маркировки μ , если существует такая последовательность переходов: $\tau = (t_1, t_2, \dots, t_k)$, что $\mu \xrightarrow{t_1} \mu' \xrightarrow{t_2} \dots \xrightarrow{t_k} \mu$.

В качестве примера рассмотрим сеть Петри, изображенную на рис. 6.8.

Пусть задано: $N = (P, T, F, H, \mu_0)$, где $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$,

$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$, $\mu_0 = (1, 1, 0, 0, 0)$. Функции F и H представлены матрицами:

$$F = \begin{array}{c|ccccc} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ \hline p_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ p_2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ p_3 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ p_4 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_5 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

$$H = \begin{array}{c|ccccc} & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 \\ \hline t_1 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ t_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ t_3 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ t_4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}$$

Фрагмент графа достижимости для сети Петри приведен на рис. 6.9.

6.4. Моделирование работы автоматизированных систем

Моделирование автоматизированных систем для оценки различных вариантов их структуры, определения оптимальных компоновочных решений проводят на проектной стадии. При этом решают задачи определения количества транспортных средств, приспособлений-спутников, накопителей, их вместимости, скорости перемещения, определение ожидаемых технико-экономических характеристик (производительности, коэффициентов загрузки и использования).

Моделирование работы автоматизированных систем позволяет также до начала их эксплуатации определить и устранить «узкие места», учесть влияние аварийных ситуаций на стабильность выполнения планового задания и другие факторы.

При разработке моделей функционирования технологических систем и, в частности, таких, как РТК, используют различные математические методы, но наибольшее применение на практике получили математические методы теории СМО, теории графов и сетей Петри.

Для примера рассмотрим несколько компоновок РТК (рис. 6.10). В данном случае обслуживание трех станков (Ст) осуществляется одним промышленным роботом с одним захватом и двумя захватами. Все

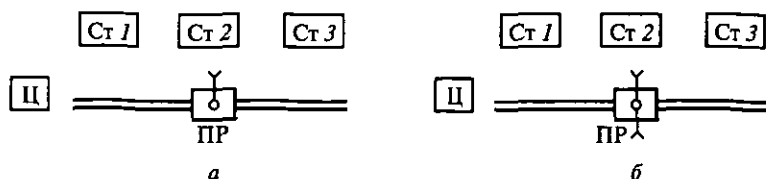


Рис. 6.10. Компонировки РТК:

а — с одним захватом; б — с двумя захватами; Ст — станок; Ц — центральный накопитель; ПР — промышленный робот

детали и заготовки находятся в центральном накопителе Ц. Циклограммы работы приведены на рис. 6.11. Время цикла обработки детали

$$T_{\text{ц}} = T_p + T_k + T_{\text{с.н}} + T_n,$$

где T_p — основное время; T_k — время контроля; $T_{\text{с.н}}$ — время смены инструмента; T_n — время позиционирования.

Время обслуживания $T_{\text{об}}$ ПР с одним захватом равно времени смены заготовки $T_{\text{с.з}}$, а с двумя захватами

$$T_{\text{об}} = 2 T_{\text{тр}} + T_z + T_v + T_{\text{с.з}},$$

где $T_{\text{тр}}$ — время транспортирования от станка к накопителю; T_z — время загрузки детали в накопитель; T_v — время выгрузки детали из накопителя.

Используя данные временных зависимостей, можно определить интенсивность поступления заказов на обслуживание и интенсивность обслуживания.

Среднее время цикла и среднее время обслуживания обусловлены случайным характером заказов на обслуживание. Среднюю частоту или интенсивность поступления заказов на обслуживание в единицу времени можно записать как

$$\lambda = \frac{1}{\overline{T_s}},$$

где $\overline{T_s}$ — среднее значение случайного периода времени T_s между двумя последовательными, не принятыми заказами на обслуживание, и времени ожидания.

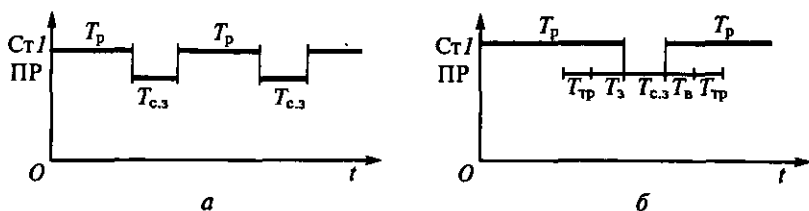


Рис. 6.11. Циклограммы работы РТК:

а — с одним захватом; б — с двумя захватами

Для станочных систем очевидно, что $T_s = T_u$ и, следовательно,

$$\lambda = \frac{1}{T_u},$$

где $\overline{T_u}$ — среднее время цикла для всех n деталей, обрабатываемых в станочной системе на протяжении рассматриваемого интервала времени,

$$\overline{T_u} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ui}}{n}.$$

Определим среднее время обслуживания. Вследствие разного времени смены заготовки на каждом станке, перегрузки деталей и особенно различного пути транспортной тележки время обслуживания каждого станка различно. Для дальнейшего расчета целесообразно определить среднее время обслуживания, исходя из прохождения через систему типовой детали

$$\overline{T_{об}} = \frac{\sum_i (n_{oi} T_{оbi})}{\sum_i n_{oi}},$$

где i — число типовых транспортных перемещений в системе; $\overline{T_{оbi}}$ — среднее время обслуживания одного станка, а также вспомогательной или измерительной станции; n_{oi} — число деталей с типовым транспортным перемещением.

Если время перегрузки и смены заготовок приблизительно одинаково, то среднее время обслуживания можно приближенно найти из уравнения

$$\overline{T_{об}} = 2T_1 + T_{сз} + \frac{S_r}{V_r},$$

где V_r — скорость транспортного устройства; S_r — средний путь между станком и накопителем.

Интенсивность обслуживания станков

$$\mu = \frac{1}{\overline{T_{об}}}.$$

Она обуславливает среднее число выполненных в единицу времени заказов на обслуживание без нарушения нормального хода работы всей системы.

В рассматриваемом случае имеем одноканальную СМО с очередью,

на которую не наложено никаких ограничений (ни по длине очереди, ни по времени ожидания).

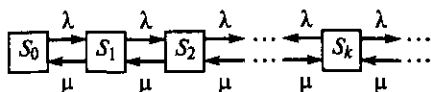


Рис. 6.12. Граф состояния манипулятора

На эту СМО поступает поток заявок с интенсивностью λ ; поток

обслуживания имеет интенсивность μ , обратную среднему времени обслуживания заявки $\bar{t}_{об}$ (рис. 6.12). Требуется найти финальные вероятности состояний СМО и характеристики ее эффективности: $L_{сист}$ — среднее число заявок в системе, $W_{сист}$ — среднее время пребывания заявки в системе, $L_{оч}$ — среднее число заявок в очереди, $W_{оч}$ — среднее время пребывания заявки в очереди, $P_{зан}$ — вероятность того, что канал занят (степень загрузки канала).

Что касается абсолютной пропускной способности A и относительной Q , то их вычислять не надо, так как очередь неограниченна, каждая заявка рано или поздно будет обслужена, поэтому $A = \lambda$, по той же причине $Q = 1$.

Состояния системы нумеруют по числу заявок, находящихся в СМО: S_0 — канал свободен, S_1 — канал занят (обслуживает заявку), очереди нет, S_2 — канал занят, одна заявка стоит в очереди, S_k — канал занят, $k - 1$ заявок стоят в очереди,

Вероятности $p_1, p_2, \dots, p_k, \dots$ находят по формулам:

$$p_1 = \rho p_0, p_2 = \rho^2 p_0, p_k = \rho^k p_0, \dots,$$

$$p_0 = 1 - \rho, \text{ тогда}$$

$$p_1 = \rho(1 - \rho), p_2 = \rho^2(1 - \rho), p_k = \rho^k(1 - \rho), \dots$$

Среднее число заявок в системе

$$L_{сист} = \frac{\rho}{1 - \rho}.$$

Среднее время пребывания заявки в системе

$$W_{сист} = \frac{\rho}{\lambda(1 - \rho)}.$$

Среднее число заявок в очереди

$$L_{оч} = \frac{\rho^2}{1 - \rho}.$$

Среднее время пребывания заявки в очереди

$$W_{оч} = \frac{\rho^2}{\lambda(1 - \rho)}.$$

Вероятность того, что канал занят

$$P_{\text{зан}} = 1 - p_0 = \rho.$$

Станочную систему с двумя захватами (см. рис. 6. 10, б) можно рассматривать на основе теории СМО в качестве замкнутой системы, где в отличие от варианта 1 сокращается время простоя станков за счет использования двухзахватного робота.

Общее количество заявок на обслуживание в данных системах равно числу станков m . В каждый момент времени манипулятор находится в одном из $m+1$ состояний: $S_0, S_1, \dots, S_m$, где S_0 — состояние, когда все станки работают; S_1 — работают все станки, кроме одного, манипулятор обслуживает этот станок по его заявке; S_2 — работают $m-2$ станков, один станок обслуживается, один станок ожидает; S_m — все станки стоят, один обслуживается, остальные станки ожидают. В этом случае интенсивность перехода из i -го состояния в состояние $i+1$ будет равна $(m-i)\lambda$, где $m-i$ — число станков, от которых может поступить заявка на обслуживание, если манипулятор находится в i -м состоянии. Интенсивность перехода из i -го состояния в состояние $i-1$ равна μ , так как в каждый момент времени манипулятор может обслуживать не более одного станка.

Вероятность перехода в состояние S_k :

$$p_k = \frac{m!}{(m-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k p_0, \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu}.$$

Используя значения p_k , можно определить: среднее использование манипулятора

$$\bar{R}_\mu = \sum_{k=1}^m p_k,$$

среднее использование одного станка

$$\bar{R}_{\text{ст}} = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (m-k) p_k;$$

коэффициент простоя при многостаночном обслуживании

$$k_{\text{ст}} = \frac{1}{m} \sum_{k=2}^m (k-1) p_k.$$

Последние формулы позволяют определить необходимые параметры при обслуживании станков манипуляторами.

6.5. Интеграция автоматизированного проектирования изготовления деталей

Характеристика методов автоматизации проектных работ

Существующие подсистемы проектирования в своем большинстве представляют собой информационно-поисковые или типовые варианты.

На рис. 6.13 показана схема методов автоматизации проектных работ, представляющие три группы.

Первая группа — информационные, поисковые подсистемы. На рис. 6.13 I_u^Y и Q_u^Y — входные и выходные данные, X_u^Y — оператор (способ проектирования).

Вторая группа представляет типовое вариантное проектирование, при котором создается обобщенная структура, а затем из нее синтезируется конкретная структура или структуры. При этом в большей или меньшей степени используется при типизации. Типовое вариантное проектирование использует различные операторы проектирования X_u^Y , основанные на наборе эвристических методов, логических или математических алгоритмов.

Третья группа методов представляет творческие действия. Они направлены на то, что неизвестно. В частности применяют эвристическое программирование.

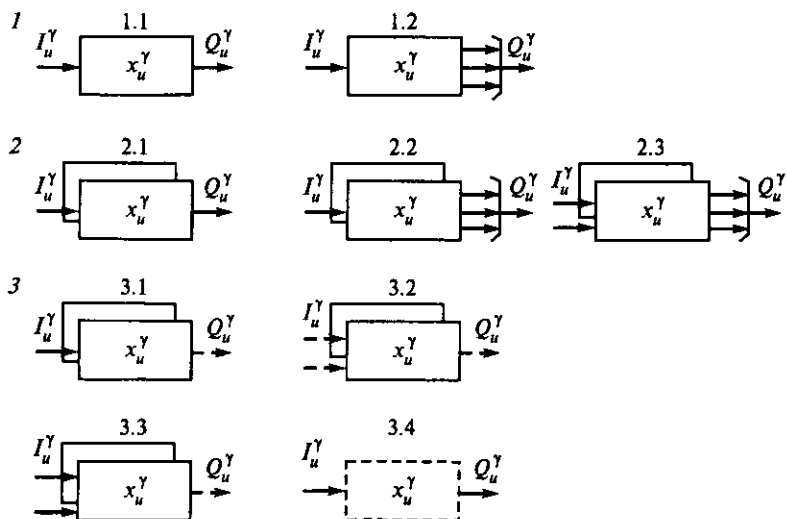


Рис. 6.13. Схема методов автоматизации проектных работ:
1, 2, 3 — группы методов

Эффективность создания и эксплуатации АПС обеспечивается интеграцией отдельных автоматизированных систем: АСНИ, САПР К, САПР ТП (АСТ ПП), АСУ ТП, АСУ. За рубежом такие системы получили название CIM (Computer Integrated Manufacturing).

В качестве примера на рис. 6.14 приведена интегрированная автоматизированная система проектирования ТП и АСУ ТП при изготовлении деталей на многопозиционных станках с ЧПУ. Вначале проектировали ТП и создавали базовую управляющую программу. При изготовлении деталей возникали отказы, которые регистрировали. Проводился анализ производственной ситуации, и автоматически принималось решение дальнейших действий (см. рис. 6.14).

Управляющие программы строили таким образом, чтобы можно было исключить отдельные их фрагменты при возникновении различных отказов.



Рис. 6.14. Схема функционирования интегрированной системы проектирования ТП

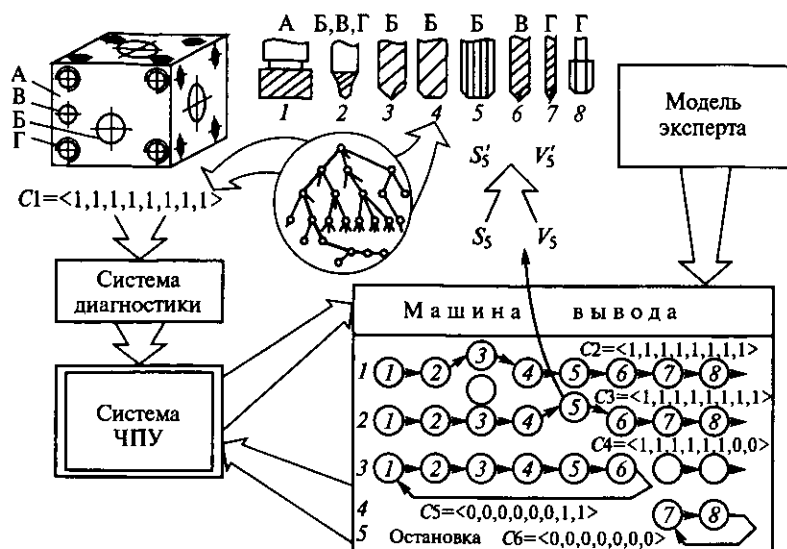


Рис. 6.15. Алгоритм и процедуры принятия решений

Например, для обработки стороны корпусной детали требуется обработать поверхности А, Б, В, Г восемью инструментами. На стадии технологического проектирования разрабатывают базовый ТП, представленный на рис. 6.15 в виде графа. Жирной линией показана цепь последовательности обработки поверхностей А, Б, В, Г и базовая управляющая программа. Оценка текущих производственных ситуаций происходит автоматически. Модель эксперта предусматривает алгоритм выработки решений дальнейших действий в случае возникновения отказов.

Модель эксперта связана с машиной вывода, на которую также воздействует диагностическая или контролирующая системы. В зависимости от сложившейся ситуации могут возникнуть различные решения для устранения возникающих отказов или обхода их.

Если процесс обработки происходит нормально (по базовому ТП), то булев вектор выполнения переходов $C1 = \langle 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 \rangle$.

При возникновении отказов возможны следующие ситуации:

1. Замена инструмента на дублирующий (например, инструмента 3, как показано на рис. 6.15).

Тогда булев вектор

$$C2 = \langle 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 \rangle.$$

2. Замена инструмента 5 на эквивалентный 5' с изменением режима резания (подачи и скорости резания) (см. рис. 6.15).

Булев вектор

$$C3 = \langle 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 \rangle.$$

3. Поломка инструмента 7 (тело инструмента осталось в отверстии).
Переходы 7 и 8 пропускаются и запоминаются.

Булев вектор

$$C4 = \langle 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0 \rangle.$$

4. Выполнение доделочных переходов 7 и 8 в другую смену.

Булев вектор

$$C5 = \langle 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1 \rangle.$$

5. Отказ технологической системы, остановка оборудования.

Булев вектор

$$C6 = \langle 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \rangle.$$

Модульные структуры управляющих программ в БД УП формируются в интерпретаторе. Получаемая реакция от системы диагностики или контроля дает воздействие на уровне УП. Происходит корректирующее воздействие.

Основой для объединения различных по назначению автоматизированных систем в комплексное автоматизированное производство является общность стратегии создания систем и применение для разработки составляющих их подсистем и основных средств обеспечения инструментальных средств.

Дальнейшее развитие САПР в машиностроении связывают с интенсивным развитием НИОКР в области компьютерных технологий, созданием компьютерных виртуальных конструкций, технологии, оснастки, инструментов, производств, что приведет к значительному ускорению освоения выпуска новых изделий. Использование методов промышленной логистики дает возможность на стадии проектирования минимизировать издержки на освоение новой продукции.

Методологию проектирования собственной продукции, а также специальное программное обеспечение относят к категории ноу-хау, что составляет коммерческую тайну предприятия. Поэтому использование инвариантных систем проектирования, поставляемых зарубежными фирмами, будет иметь ограниченный характер, так как они не обеспечивают скачок в повышении качества продукции. Получение экономической отдачи от вложенных средств в компьютерные технологии проектирования и производства требует от предприятий поэтапного и системного подхода к проведению работ по компьютеризации, созданию определенной «критической массы» специализированного программного продукта, обеспечивающего окупаемость произведенных затрат и получение прибыли.

Предпочтение отдается интеллектуальным системам, основой для создания которых является искусственный интеллект на базе эвристического программирования. В этом случае значимы эвристики, основанные на дальнейшем развитии научных основ технологии машиностроения, в частности на создании теории и практики принятия решений, в том числе формализованных.

Дальнейшее развитие САПР связано с глобальными процессами информатизации и компьютеризации, что открывает широкие возможности повышения эффективности в машиностроении. Эти возможности стали реальностью благодаря совокупности методов и средств CALS-технологий, представленных в серии международных стандартов.

6.6. Развитие информационных технологий и создание виртуальных производственных систем

Количественные и качественные изменения в развитии современного машиностроения требуют не простой, частичной переналадки отдельных элементов ТП (оборудования, технологической оснастки), а глубоких изменений во всем производстве, включая производственные и ТП, организацию и управление. Наибольшую актуальность проблема переналадки ПС приобретает в современный период развития машиностроения. Этот период характеризуется необходимостью обеспечения конкурентоспособности производимой продукции, что означает оперативное реагирование на изменение потребительского спроса, снижение себестоимости ее выпуска при существенном сокращении сроков выпуска и повышении качества. Эта проблема предусматривает решение задачи технического перевооружения машиностроения, связанного прежде всего с увеличением номенклатуры выпускаемой продукции, что требует создания быстропереналаживаемых ПС.

Если в условиях массового и крупносерийного производств ПС однозначно ориентированы на выпуск конкретного изделия, то в условиях серийного, мелкосерийного и единичного они ориентированы на выполнение некоторого множества технологических операций. В этом случае ПС по объективным причинам оказываются недогруженными. Образуется фонд свободного времени по каждому виду технологического оборудования, что существенно снижает рентабельность ПС в целом.

Каждая из существующих ПС изначально ориентирована на выпуск определенной группы видов изделий. Их параметры с точки зрения технологии изготовления оказываются различными (одни ПС ориентированы на выпуск преимущественно деталей типа тел вращения,

другие — корпусных и т. д.). При этом приходится говорить о ПС, как о РПС. Под РПС будем понимать отдельные ПС, организационно не связанные между собой технологическим оборудованием, необходимым для выполнения ТП изготовления конкретного вида заданной для них продукции.

В последнее время скорость организационных перестроек в проектных организациях существенно опережает скорость перестройки на промышленных предприятиях, что усиливает конкуренцию. Все это остро ставит вопрос об оперативном реагировании производства на изменение потребительского спроса, что требует разработку методов обеспечения быстрой перестройки и адаптации ПС для выполнения очередных проектов. Причем выполнение таких проектов должно предусматривать изготовление деталей широкой номенклатуры различного количества.

Появление рынка проектных услуг конструкторских бюро выдвигает требование формирования ПС, способных реализовать разрабатываемые проекты в короткие сроки при обеспечении заданных параметров. Время жизненного цикла проектов может быть достаточно малым, поэтому проводить физическую перестройку существующих ПС для их реализации оказывается невозможным. Кроме того, при реализации нескольких проектов, а во многих случаях даже одного, требуется одновременное изготовление некоторого количества деталей различной номенклатуры. Здесь приходится говорить о многообъектном проектировании и изготовлении, при этом формируемая ПС является объектно-ориентированной.

Формирование ПС для этих целей традиционными методами, связанными с материальными перестройками существующих ПС, оказывается невозможным. Возникает необходимость в поиске новых подходов к процессам формирования ПС с требуемыми свойствами без осуществления трудоемких материальных перестроек.

Решением данной проблемы является обеспечение возможности создания ПС на базе существующих, путем проведения мероприятий, использующих временные (на период жизненного цикла проекта) организационные связи, без трудоемких материальных перестроек. Материальной основой такой ПС является совокупность технологического оборудования РПС в рамках фонда их свободного времени. В виду того что при построении такой ПС отсутствуют материальные изменения в РПС, а информация о ее структуре формируется и хранится только в памяти ЭВМ, то такая ПС является виртуальной, при этом обеспечивается значительное сокращение сроков ее создания.

Растущая конкуренция на современном мировом рынке товаров и услуг заставляет производителей заботиться о конкурентоспособнос-

ти своей продукции. Помимо традиционных способов ее повышения, таких, как снижение стоимости; повышение качества, надежности и эффективности; расширение функциональных возможностей, все большую актуальность стали приобретать следующие:

- снижение затрат на эксплуатацию, ремонт и утилизацию;
- обеспечение простоты и удобства эксплуатации и обслуживания;
- быстрота реакции на потребности рынка;
- доступность актуальной документации и простота ее обработки;
- снижение временных и материальных затрат на обучение персонала по эксплуатации.

Современный уровень развития компьютерной техники, информационных технологий и разработки программного обеспечения (САПРов различных предметных областей, АСУ, ИАСУ и т.д.) позволяет компьютеризировать практически любой вид деятельности человека, связанный с обработкой информации. Эти проблемы решались объединением различных САПРов в интегрированные системы за счет физического объединения баз данных, однако при этом полностью отсутствовала привязка их логических структур, что приводило к фрагментации информации; многократному дублированию данных; несовместимости различных представлений об одном и том же изделии; невозможности интеграции различных ИАСУ.

Указанные проблемы можно решить за счет:

- согласований информационных представлений об изделиях и процессах;
- организации активного обмена согласованной информацией об изделиях и процессах между деловыми партнерами;
- исчерпывающего анализа всех факторов, влияющих на конкурентоспособность изделий в современном представлении.

Все эти подходы были объединены в рамках концепции CALS (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support — Поддержка Жизненного Цикла Изделий).

В системе CALS-технологий (Computer Acquisition and Life-Cycle Support) создаются CALS-стандарты. Данные стандарты необходимо рассматривать в соответствии со следующими документами:

- существующими стандартами РФ, ISO и IES, которые можно использовать без изменений;
- существующими документами, которые можно использовать для частичного выполнения требований CALS;
- стандартами, которые в настоящее время находятся на стадии разработки в Госстандарте РФ, ISO, IES;

- техническими заданиями по разработке стандартов для организаций, способных их реализовать, в областях, где в настоящее время не ведутся работы по стандартизации.

Под CALS-технологией понимают компьютеризацию сфер промышленного производства. Основной ее задачей является унификация и стандартизация спецификаций промышленной продукции на всех этапах ее жизненного цикла.

Расширение областей внедрения CALS-стандартов тесно связано со стремительно изменяющимися возможностями информационных технологий. Они требуют от организаций динамичного и гибкого процесса, включающего:

- широкое согласование промышленных/коммерческих требований;
- утверждение результатов этого согласования;
- активное привлечение поставщиков инструментальных средств CALS.

Развитие CALS-технологий должно привести к появлению так называемых виртуальных производств, при которых создание технологического обеспечения оборудования с ЧПУ для изготовления изделий может быть распределено во времени и пространстве между многими проектными организациями и промышленными предприятиями.

Построение открытых распределенных автоматизированных систем для проектирования и управления в машиностроении составляет основу современной CALS-технологии. При этом структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартными. В этом случае реальной становится успешная работа под общим проектом разных коллективов, использующие неодинаковые CAD/CAM. Таким образом, информационная интеграция является неотъемлемым свойством CALS-систем.

Конкретные задачи в области стандартизации должны базироваться на архитектуре стандартов, охватывающих диапазон бизнес-процессов на протяжении всей цепочки «поставщик – заказчик» и всего жизненного цикла изделия, а также различных взглядов на совместно используемую информацию, необходимую для поддержки каждого из этих процессов.

Данные задачи должны быть сформулированы с учетом:

- единого понимания данных и взаимосвязей, совместно используемых на протяжении жизненного цикла, включая процессы управления конфигурацией изделия;
- управления данными об изделии на протяжении всего жизненного цикла, включая описание требований;
- извлечения и передачи информационных продуктов;

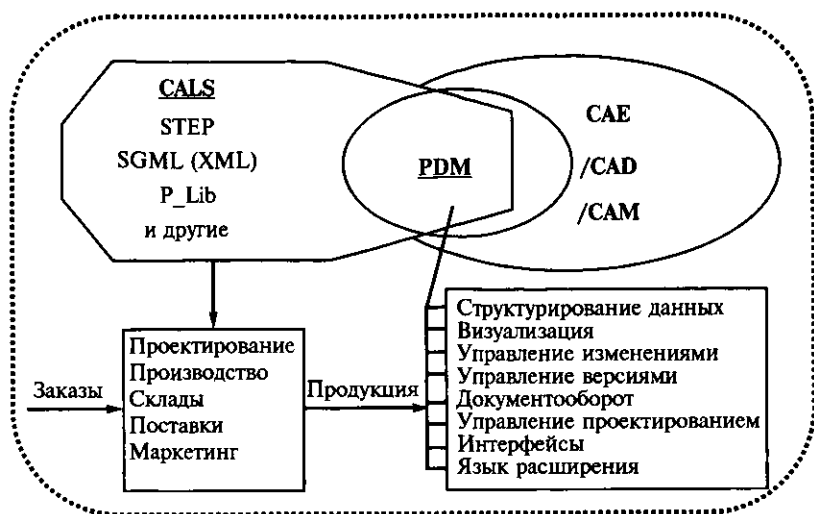


Рис. 6.16. Структурная схема проблематики CALS-технологии

- требований по поддержке проведения и управления бизнес-процессами, включая коммерческие транзакции и управление проектами.

На рис. 6.16 приведена структурная схема проблематики CALS-технологии в свете вышесказанного. В основу CALS-технологии положен ряд стандартов (см. рис. 6.1) и прежде всего: STEP (Standard for Exchange of Productdata), SGML (Standard Generalized Markup Language), P_LIB (Parts Library).

CALS-технология интегрируется с CAE/CAD/CAM, в область пересечения этих систем попадает PDM (Product Data Manager).

CALS-технология на входе связана с заказами, а на выходе — с готовой продукцией с учетом прохождения всего жизненного цикла (см. рис. 6.16).

CALS-технология позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описания многих составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в БД сетевых серверов, доступных любому пользователю технологии CALS. Эти технологии обеспечивают легкость распространения передовых проектных решений, возможность многократного воспроизведения частей проекта в новых разработках и др. Информацию о параметрах РПС можно представить в электронном виде и распространять с помощью различных информационных сетей, в частности глобальной сети Internet. В этом случае можно говорить о формировании рынка услуг РПС.

При создании ВПС на основе РПС необходимо решить ряд задач, связанных с ее организацией и управлением. Организация ВПС напрямую связана с технологическим содержанием реализуемых проектов. В этой связи оказывается возможным выбор лучшей, в рамках текущих возможностей РПС, конфигурации ВПС путем варьирования структурами проектируемых ТП. Следовательно, процессы организации ВПС и технологического проектирования оказываются взаимосвязанными, т. е. имеет место прямая и обратная связи информационных потоков, сопровождающих эти процессы. Формирование информационных потоков, принятие на их основе решений, осуществление процессов управления являются сложными процессами, которые должны протекать за минимальное время, что требует разработки системы управления, функционирующей преимущественно без участия человека. Для таких условий наиболее эффективными оказываются интеллектуальные системы управления, которые принимают на себя задачи рутинного характера, а также некоторые творческие функции человека при решении задач в условиях реального масштаба времени.

Основными задачами, решаемыми при формировании ВПС, являются технологическое и организационное управления. Целью технологического управления является получение требуемых свойств изделий. Цель организационного управления можно сформулировать как синхронизацию во время взаимодействия всех свободных ресурсов РПС между собой, а также РПС с внешней средой.

Особенностью технологического управления является генерирование и выбор рациональных ТП, позволяющих при обеспечении заданных параметров получаемых изделий максимально использовать возможность РПС в рамках ВПС. Здесь особую роль играют процедуры проектирования ТП. При технологическом проектировании решают задачи по всем этапам ТП — от получения заготовки до приемки собранных изделий, но особое внимание уделяется этапам механической обработки заготовок, поскольку эти процессы наиболее ответственны с точки зрения качества создаваемых машин и трудоемки (на них приходится 60–80% всей трудоемкости изготовления изделий). В связи с этим они являются определяющими во всем цикле производства машин.

Сложность ТП и ответственность принимаемых при их проектировании решений обуславливает необходимость применения методов и средств САПР. При автоматизации проектирования ТП необходимо учитывать характер и взаимосвязи факторов, влияющих на их построение и определяющих заданное качество изготавливаемых изделий и экономическую эффективность.

Проектирование ТП включает в себя ряд иерархических уровней: разработку принципиальной схемы ТП, представляющей последователь-

ность этапов укрупненных операций; проектирование технологических маршрутов обработки деталей; проектирование технологических операций; разработку управляющих программ для оборудования с ЧПУ.

Процессы оперативного и технологического управлений являются взаимосвязанными, что должно быть учтено при реализации разработанных проектов. В условиях ВПС процессы проектирования ТП, их реализация и управление могут быть обеспечены только при наличии мощных средств вычислительной техники, использующих базы данных и знаний и составляющих основу информационного обеспечения интеллектуальной системы.

Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит математическое моделирование?
2. Какие требования предъявляют к ММ?
3. По каким признакам классифицируются ММ?
4. В чем заключается суть структурных ММ?
5. Чем характеризуются табличные, сетевые и перестановочные ММ?
6. Для каких целей предназначены функциональные ММ?
7. Перечислите основные характеристики ММ на различных иерархических уровнях.
8. В чем заключаются особенности аналитических, алгоритмических и имитационных моделей?
9. В чем заключается методика получения ММ?
10. Для чего необходимы преобразования ММ в процессе получения рабочих программ анализа?
11. Назовите особенности ММ на микроуровне.
12. Назовите особенности ММ на макроуровне.
13. Назовите особенности ММ на метаяуровне.
14. В чем заключается использование ММ на микроуровне?
15. В чем заключается использование ММ на макроуровне?
16. Какие ММ на метаяуровне можно описать путем использования целочислений программирования?
17. В чем заключаются марковские случайные процессы?
18. Приведите уравнения Колмогорова финальных вероятностей состояний объекта?
19. Опишите СМО.
20. Какие параметры эффективности требуется определить при использовании СМО?
21. Какие особенности возникают при использовании сетей Петри?
22. В чем заключается построение графа достижимости для сети Петри?
23. В чем заключается имитационное моделирование?
24. Как проверяется детерминированная ММ на чувствительность к случайным отклонениям?
25. Какие преимущества дает интеграция подсистем?
26. В чем заключается развитие компьютерных технологий?

Глава 7

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ПРОЦЕССАМИ

7.1. Общее представление об управлении технологическими объектами

Характеристика систем управления

Под технологическими объектами (ТО) в машиностроении понимают технологическое оборудование (станки, роботы и т. д.), обеспечивающее выполнение тех или иных ТП. Современные ТО представляют собой комплекс сложных динамических систем. Их сложность обусловлена высокими требованиями к производительности и точности работы ТО. Управление процессами и объектами в машиностроении осуществляется с помощью систем управления.

Под управлением будем понимать процесс перевода ТО из одного состояния (начальное) в другое (конечное) за конкретный промежуток времени Δt с затратой заданного объема ресурсов.

Система управления (СУ) — комплекс устройств и средств связи, обеспечивающий точное и согласованное во времени взаимодействие рабочих и вспомогательных агрегатов и устройств ТО в соответствии с заранее разработанной программой управления на основе принятого ТП.

Системы ЧПУ позволяют все операции, связанные с пуском, остановкой, включением и выключением вспомогательных устройств, а также операции по обеспечению требуемых значений параметров (величин), определяющих ход ТП в управляемом объекте, выполнять без участия обслуживающего персонала, только устройствами автоматического управления.

Следящими системами называются СУ, с помощью которых на управляемом объекте воспроизводится изменение входной величины произвольно заданной во времени и, как правило, с усилением по мощности.

Программа — способ достижения цели с однозначным описанием процедуры его реализации. Программа функционирования ТО — совокупность команд, которые должен выполнять ТО.

Разрешающая способность СУ — наименьшее изменение выходного параметра состояния ТО, которое может быть задано и зарегистрировано ее измерительной системой.

Дискрета — минимальная теоретическая величина реакции ТО на единичное изменение управляющего сигнала.

Основное назначение системы управления ТО — выполнение команд для поддержания требуемых значений параметров выполняемого ТП при заданной точности с наибольшей производительностью.

Выбор СУ во многом зависит от специфики ТП, в котором эксплуатируется ТО, и от требований экономики.

Система автоматического управления ТО должна выполнять следующие задачи:

- реализовывать требуемые действия исполнительных механизмов;
- обеспечивать заданные режимы ТП;
- поддерживать требуемые параметры объекта производства;
- выполнять вспомогательные команды.

Основные требования к системам автоматического управления: управление сложным циклом функционирования ТО; высокая мобильность; точность при высокой надежности в работе; простота конструкции и низкая стоимость; дистанционность в управлении; возможность саморегулирования в процессе управления.

Команды, задаваемые ТО в системах программного управления, делят на три категории.

1. Технологические команды, обеспечивающие требуемые действия рабочих органов ТО при выполнении ТП.

2. Цикловые команды, к которым относят изменения параметров ТО (например, переключение скорости и подач, выбор инструмента, выключение охлаждения, реверс и т. д.).

3. Команды на выполнение служебной или логической информации, обеспечивающие правильность выполнения ТО всех задаваемых ему команд (обозначение адресов, знаки разделения команд, контрольные числа). Эти команды зависят от принятой системы их кодирования.

По командной информации СУ классифицируют следующим образом.

1. Системы управления, работающие на основе полной начальной информации: СУ с распределительным валом; копировальные СУ; цикловые СУ; системы с ЧПУ (СПЧУ).

2. Системы управления, работающие на основе неполной начальной информации: экстремальные системы (обеспечивают оптимальное управление путем изменения управляющего воздействия); самонастраивающиеся СУ (обеспечивают оптимальное управление путем изменения параметров системы и управляющих воздействий); самоорганизующиеся СУ (обеспечивают оптимальное управление путем изменения ее структуры,

параметров и управляющего воздействия); самообучающиеся СУ (обеспечивают оптимальное управление путем изменения алгоритма управления или параметра управляющего действия).

Анализ ТО

При подготовке производства необходимо проводить анализ ТО на основании изучения соотношения следующих трех информационных составляющих процесса производства:

- 1) выбор ТО и подбор нормализованной или унифицированной оснастки, приспособлений, инструмента и т. д. (J_c);
- 2) проектирование специальной оснастки, приспособлений, инструмента (J_v);
- 3) управление вручную оператором (J_m)

$$J = J_c + J_v + J_m. \quad (7.1)$$

Составляющая J_m отсутствует, если обработка производится автоматическими ТО. Составляющие J_c и J_v не зависят от оператора.

Степень автоматизации управления оборудования можно определить по формуле

$$A = (J_c + J_v) / (J_c + J_v + J_m). \quad (7.2)$$

Если $A = 1$, то используемые ТО — автоматическое оборудование, если $A \rightarrow 0$ — универсальное оборудование.

Величина

$$B = J_c / (J_c + J_v) \quad (7.3)$$

показывает степень гибкости: $B = 1$ — легкопереналаживаемые ТО, $B \rightarrow 0$ — ТО переналаживаются с большими затратами.

При $B = 1$ используют ТО с ручным управлением ($J_c \rightarrow \min$, $J_v \rightarrow 0$, $J_m \rightarrow \max$). В этом случае производительность определяется возможностями оператора и имеет место максимальная гибкость.

При $B \rightarrow 0$ используют автоматические ТО ($J_c \rightarrow \min$, $J_v \rightarrow \max$, $J_m \rightarrow 0$). Переналадка сопровождается большими экономическими затратами.

При ТО с СЧПУ $J_c \rightarrow \max$, $J_v \rightarrow \min$, $J_m \rightarrow 0$. В этом случае большая доля информации относится к ТО. При переходе с одного объекта производства на другой затраты меньше, чем в предыдущем случае, за счет более высокой гибкости, при этом производительность выше, чем в первом случае.

На основании сказанного можно сделать вывод, что автоматические ТО целесообразно использовать в крупносерийном и массовом производствах, когда требуется максимальная производительность при практически неизменной номенклатуре производства.

В мелкосерийном и серийном производствах целесообразно использовать ТО с СЧПУ, обеспечивающими выполнение ТП в автоматическом режиме. При этом появляется возможность быстрой переналадки на выпуск продукции при смене номенклатуры производимой продукции.

В экспериментальном и частично в мелкосерийном производствах целесообразно использовать универсальные ТО, так как в этом случае достигается максимальная гибкость.

Так как ТО неотделим от СУ, то он накладывает свои особенности на ее конструкцию. Однако любая СУ независимо от характера ТП, для которого она предназначена, должна максимально отвечать следующим требованиям:

- исполнение команд с высоким быстродействием и точностью;
- гибкость при смене объекта производства;
- синхронизация выполняемых действий в различных циклах;
- высокая надежность работы;
- автоматическое регулирование процесса выполнения ТП и поддержание его оптимальных параметров;
- простота конструкции, низкая стоимость и удобство обслуживания;
- широкий спектр выполняемых действий;
- короткий цикл подготовки программы выполнения ТП;
- выполнение большого количества технологических команд (переключение подач, чисел оборотов шпинделя, поворот резцовой головки, включение и выключение охлаждения инструмента);
- управление продолжительными циклами без смены программно-носителя.

Системы управления ТО классифицируют по различным признакам: по принципу синхронизации, степени централизации управления, методу воздействия, виду программноносителя, числу управляемых координат, способу программирования, наличию обратной связи, типу привода и др.

Особенности систем управления станками

Системы управления станками разделяют на централизованные, децентрализованные и смешанные.

Централизованные (независимые) СУ управления характеризуются тем, что управление всем технологическим циклом станка-автомата и АЛ осуществляется с центрального командного пункта ТО независимо от действия и положения его исполнительных рабочих органов. Благодаря простоте схемы управления, надежности в работе, удобству обслуживания и наладки централизованные СУ получили наибольшее применение в станках.

Децентрализованные СУ (их называют иногда путевыми) осуществляют управление с помощью датчиков (чаще всего путевых переключателей и конечных выключателей), включаемых на пути движущихся исполнительных органов ТО. Эти системы основаны на управлении, при котором все исполнительные органы связаны между собой так, что каждое последующее движение одного может происходить только после окончания движения предыдущим. Преимуществом такой СУ является отсутствие сложной блокировки, так как команды даются после окончания предыдущей операции.

Смешанные СУ являются комбинацией первых двух систем. Здесь управление некоторыми элементами цикла осуществляется как в децентрализованной системе, а остальными — от центрального командного устройства.

Системы управления, применяемые в ТО, весьма разнообразны как по своему назначению, так и по конструктивному оформлению. Однако в любом ТО можно выделить две основные части: управляющее устройство и управляемые узлы — агрегаты или другие рабочие органы, выполняющие заданный ТП.

Технологический процесс характеризуется несколькими параметрами (подача, скорость, усилие, температура и т. д.), которые для правильного хода его выполнения поддерживаются постоянными или изменяются по определенному закону. Управляющее устройство воздействует на рабочий орган станка в соответствии с программой управления.

При традиционных методах автоматизации весь объем информации, необходимый для изготовления деталей, воспроизводится в кулачках, копирах, шаблонах, упорах и других устройствах, с помощью которых эта формация затем передается ТО как программа обработки данной детали. Подобный способ усложняет подготовку и задание программы обработки. Такие СУ не могут обеспечить высокой гибкости и перенастраиваемости оборудования на изготовление новой детали. Появление СЧПУ позволило коренным образом решить эту задачу.

В ТО с цифровым программным управлением на всех этапах подготовки программы обработки, вплоть до ее задания ТО, оперируют только информацией в цифровой (дискретной) форме с рабочего чертежа детали. Это позволяет применять математические методы для подготовки программ и автоматизировать весь процесс их изготовления с помощью ЭВМ.

В металлообработке среди автоматических систем управления широко распространены так называемые аналоговые системы, в которых в качестве программноносителей используют аналоги, определяющие перемещения исполнительных устройств станков (копиры, кулачки, упоры). Исходная информация о процессе отработки преобразуется и выдается в виде копируемой модели обрабатываемой детали. Например, на

токарном станке упоры, расставленные по ходу движения, могут служить аналогом перемещений продольного и поперечного суппортов. Подобные системы называются замкнутыми, так как в них используют два потока информации: первый поток информации — положение конечного выключателя (программа), второй — фактическое положение исполнительного механизма.

В незамкнутой СУ в формообразовании детали используется кулачок с профилем, соответствующим запрограммированной обработке. В этом случае аналогом перемещения исполнительного устройства является профиль кулачка.

Копировальные системы управления используют в качестве программноносителя копир (или шаблон) и подразделяются на копировальные системы прямого и непрямого действия.

На рис. 7.1 представлена схема копировальной СУ прямого действия. Достоинством такой системы является простота конструкции, а недостатком — быстрый износ толкателя и шаблона (копира) от силы резания, что снижает точность обработки и требует изготовления нескольких шаблонов на малую партию изготавливаемых деталей из труднообрабатываемого материала.

Копировальные СУ непрямого действия обеспечивают снижение величины силы, действующей на шаблон (копир), за счет применения соответствующих усилителей, например гидроусилителя (рис. 7.2). Система имеет обратную связь, которая отслеживает положение штока золотника и стремится свести ошибку слежения к минимуму. При всей сложности такая система имеет большое достоинство — более высокую точность обработки и достаточно большой срок службы шаблона. Величина зазора Δ в золотнике является переменной и определяется текущей скоростью смещения его штока.

Особенностью аналоговых систем управления ТО является такой вид программноносителя, при котором программа обработки фактически материализуется. Использование аналогового программноносителя обеспечивает неограниченные человеком возможности роста производительности обработки, но при этом сокращает возможность быстрой переналадки оборудования.

Развитие аналоговых систем управления в направлении, при котором стал возможным ввод и смена управляющей информации непосред-

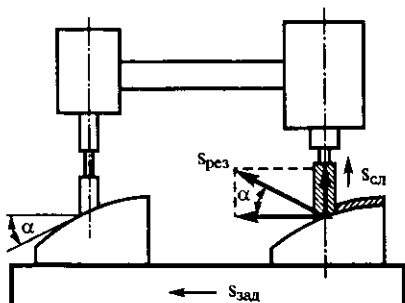


Рис. 7.1. Копировальная система прямого действия

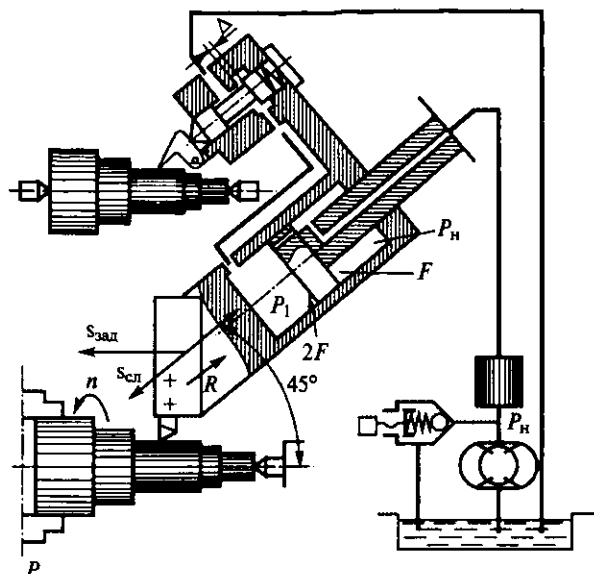


Рис. 7.2. Устройство копировальной системы с гидроусилителем

ственно на рабочем месте, привело к созданию СЧПУ (рис. 7.3). В таких системах программа представляет собой информацию, кодированную определенным образом и носящую знаковый вид.

Различают позиционные, контурные и комбинированные СУ.

К позиционным системам программного управления (СПУ) относят системы, в которых траектория и скорость движения не программируются, а задаются только начальное и конечное положения управляемого органа станка. Эти системы служат только для совершения установочных движений. В них траектория перемещения рабочего органа может быть произвольной. Требования по точности предъявляют только к конечному положению рабочего органа (координатно-расточные станки, сверлильные, толкатели в транспортных системах и т. д.).

К контурным СПУ относят системы, в которых осуществляется не-



Рис. 7.3. Структура системы ЧПУ

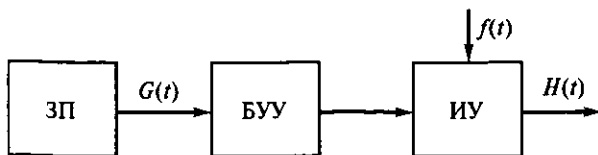


Рис. 7.4. Структурная схема разомкнутой системы управления:

ЗП — задатчик программ; БУУ — блок устройства управления;
ИУ — исполнительное устройство

прерывное управление движением двух или более исполнительных органов станка, что обеспечивает возможность обработки криволинейных контуров или поверхностей. В этих СУ требования по точности предъявляются к траектории перемещения рабочего органа и к текущему положению его в каждый момент времени.

В ТО с программным управлением используют три фундаментальных принципа автоматического управления — принцип разомкнутого управления, обратной связи и компенсации.

Принцип разомкнутого управления наиболее прост в реализации, так как не требует дополнительных устройств. Структурная схема СУ, реализующей этот принцип, представлена на рис. 7.4. Задатчик программ (ЗП) задает необходимую информацию блоку устройства управления (БУУ), который управляет исполнительным устройством (ИУ). Необходимо, чтобы выходная информация $H(t)$ была максимально близка к заданной $G(t)$, что в реальных условиях осложняется целым рядом таких факторов, как неточность выполнения отдельных устройств и механизмов, возмущающих воздействий и пр. Действие этих факторов можно выразить некоторой функцией $f(t)$.

Если необходимая степень соответствия выходной и входной информации не достигается при использовании данной схемы построения СУ, то применяют другие принципы управления. Реализация этих принципов предусматривает введение обратной связи в схему управления.

Структурная схема замкнутой СУ представлена на рис. 7.5. С задатчика программы (ЗП) информация поступает в блок сравнения информации (БСИ), затем в блок управления устройством (БУУ), который управляет исполнительным устройством (ИУ). Далее датчик в совокупности с устройством преобразования информации преобразует фактическое действие ИУ в информацию, имеющую вид, удобный для сравнения с информацией, поступающей в БСИ от задатчика программы. Это позволяет автоматически контролировать точность отработки заданной программы. Большое значение в цепи обратной связи имеет датчик обратной связи (Д), который служит для преобразования выходной информации в сиг-

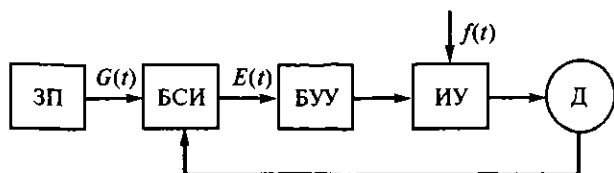


Рис. 7.5. Структурная схема замкнутой системы управления:

ЗП — задатчик программы; БСИ — блок сравнения информации; БУУ — блок устройства управления; ИУ — исполнительное устройство; Д — датчик

налы, соответствующие по своей физической природе сигналам с ЗП. Таким образом, датчик является измерительным преобразователем (преобразует изменение одной физической величины в изменение другой).

Принцип компенсации (комбинированное управление) позволяет уменьшить или исключить совсем последствия влияния вредных факторов (деформация технологической системы под действием температурных факторов, сил резания и т. д.), воздействующих на ТО.

Система автоматического управления является астатической по отношению к управляющему воздействию, если при стремлении управляющего воздействия к постоянной величине ошибка приближается к нулю и не зависит от управляющего воздействия.

Система автоматического управления является статической по отношению к управляющему воздействию, если при стремлении последнего к постоянной величине ошибка также стремится к постоянной, отличной от нуля, величине и зависит от управляющего воздействия.

Как видно из схемы, представленной на рис. 7.5, наличие рассогласования является необходимым условием изменения состояния исполнительного устройства ТО. Однако наличие рассогласования во многих случаях приводит к погрешностям отработки командной информации и, как следствие, к браку при выполнении ТП. При малых скоростях изменения управляющего воздействия погрешность относительно небольшая, и ею можно пренебречь. В тех же случаях, когда это изменение имеет большую величину или управление осуществляется по нескольким координатам, погрешность существенно возрастает. Наиболее простой способ уменьшения ошибки — снижение скорости изменения управляющей информации. В этом случае значительно меньше сказываются динамические ошибки и погрешность также уменьшается. Однако применение такого способа удлиняет рабочий цикл, что приводит к снижению производительности ТО.

В системе управления большую роль играет коэффициент передачи составляющих ее звеньев. Для информационных потоков в системе управления можно записать

$$E(t) = G(t) - H(t), \quad (7.4)$$

где $G(t)$ — исходная информация (требуемые параметры); $H(t)$ — информация о выходных параметрах; $E(t)$ — информация о рассогласовании между указанными потоками информации.

Регулируемый выходной параметр

$$H(t) = E(t) k. \quad (7.5)$$

Здесь k — произведение коэффициентов усиления звеньев, составляющих прямую цепь системы управления.

В системах управления ТО обычно применяют обратную связь с коэффициентом передачи, равным 1. В этом случае можно записать:

$$H(t) = k [G(t) - H(t)]. \quad (7.7)$$

При наличии внешних возмущающих воздействий полученное выражение имеет следующий вид:

$$H_1(t) = k [G(t) - H_1(t)] - f_1(t);$$

$$H_2(t) = k [G(t) - H_2(t)] - f_2(t).$$

Здесь изменению воздействия внешнего параметра от $f_1(t)$ до $f_2(t)$ соответствует изменение выходного параметра от $H_1(t)$ до $H_2(t)$, т. е.

$$\Delta H(t) = H_1(t) - H_2(t). \quad (7.8)$$

или

$$\Delta H(t) = k [G(t) - H_1(t)] - f_1(t) - k [G(t) - H_2(t)] + f_2(t).$$

Преобразуем эту формулу:

$$\Delta H(t) = k [H_1(t) - H_2(t)] + f_2(t) - f_1(t);$$

$$\Delta H(t) = k [-\Delta H(t)] + \Delta f(t)$$

и окончательно получим

$$\Delta H(t) = \frac{\Delta f(t)}{1 + k}. \quad (7.9)$$

Из последней формулы видно, что отклонение регулируемого параметра от заданного прямо пропорционально возмущающему внешнему воздействию (сила трения в направляющих, сила резания и др.) и обратно пропорционально произведению коэффициентов усиления звеньев прямой цепи. Следовательно, для повышения точности СУ необходимо увеличивать коэффициент усиления звеньев, однако в некоторых случаях это может привести к потере устойчивости. Поэтому всякое изменение параметров звеньев, составляющих СУ, следует проверять на устойчивость.

7.2. Формирование управляющей информации

Как правило, выходная информация от СЧПУ $G(t)$ представляется в унитарном коде (последовательность импульсов). В замкнутых СУ в устройстве сравнения информационные потоки должны иметь одинаковую форму представления.

При формировании командной информации используют линейную и круговую интерполяцию.

Формирование управляющей информации при линейном перемещении рабочего органа ТО по двум координатам производится, согласно зависимостям,

$$\begin{aligned} S_x &= S \cos(\alpha); \\ S_y &= S \sin(\alpha). \end{aligned} \quad (7.10)$$

Положение рабочего органа в каждый момент времени определяется следующими формулами:

$$\begin{aligned} L_x &= \int S_x dt; \\ L_y &= \int S_y dt. \end{aligned} \quad (7.11)$$

Здесь в качестве исходных данных выступают следующие параметры: S — контурная скорость; L — длина отрезка прямой; α — угол наклона отрезка прямой по отношению к осям координат.

Структурная схема модели реализации такого управления представлена на рис. 7.6. Математическую модель процесса формирования управляющего воздействия можно представить в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1^- \\ H_2^- \end{bmatrix},$$

где $A_{n,m}$ — коэффициенты матрицы перехода.

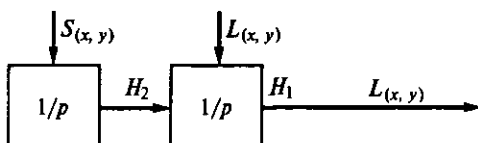


Рис. 7.6. Структурная модель для случая линейной интерполяции

$$\Delta t = \frac{\Delta}{S},$$

где Δ — величина дискреты перемещения, обеспечиваемой СУ.

Начальные условия:

по оси X	по оси Y
$Z_1 = 0;$	$Z_1 = 0;$
$Z_2 = S \cos(\varphi);$	$Z_2 = S \sin(\varphi).$

Коэффициенты матрицы перехода

$$A_{11} = 1; A_{12} = \Delta t; A_{21} = 0; A_{22} = 1.$$

Текущие значения:

$$\begin{aligned} H_1 &= A_{11} H_1^- + A_{12} H_2^- = H_1^- + H_2^- \Delta t; \\ H_2 &= A_{21} H_1^- + A_{22} H_2^- = H_2^-; \\ L &= H_1. \end{aligned} \quad (7.12)$$

При круговой интерполяции траектория движения исполнительного органа ТО рассматривается в виде дуги окружности. При этом положение рабочего органа ТО по каждой из координат определяется как

$$\begin{aligned} L_x(t) &= R \cos(\omega t); \\ L_y(t) &= R \sin(\omega t). \end{aligned}$$

Здесь в качестве исходных данных выступают следующие параметры: S — контурная скорость; R — радиус окружности; φ_1 — начальный угол дуги окружности; φ_2 — конечный угол дуги окружности.

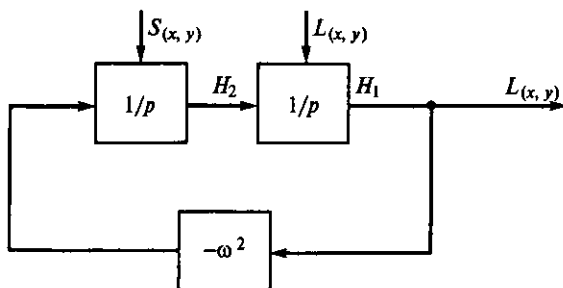


Рис. 7.7. Структурная модель для случая круговой интерполяции

Структурная схема модели реализации такого управления, представлена на рис. 7.7. Математическую модель процесса формирования управляющего воздействия можно представить в матричной форме

$$\begin{vmatrix} H_1 \\ H_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} H_1^- \\ H_2^- \end{vmatrix},$$

где $A_{n,m}$ — коэффициенты матрицы перехода.

Угловая скорость

$$\omega = S/R.$$

Дискрета времени

$$\Delta t = \frac{\Delta}{S}.$$

Коэффициенты матрицы перехода

$$\begin{aligned} A_{11} &= \sin(\omega \Delta t); \\ A_{12} &= 1/\omega \cos(\omega \Delta t); \\ A_{21} &= -\omega \cos(\omega \Delta t); \\ A_{22} &= A_{11}. \end{aligned}$$

Начальные значения:

по оси X	по оси Y
$Z_1 = R \cos(\varphi_1);$	$Z_1 = R \sin(\varphi_1);$
$Z_2 = S \sin(\varphi_1);$	$Z_2 = S \cos(\varphi_1).$

Текущее значение

$$\begin{aligned} H_1 &= A_{11} H_1^- + A_{12} H_2^-; \\ H_2 &= A_{21} H_1^- + A_{22} H_2^-; \\ L &= H_1. \end{aligned} \tag{7.13}$$

Использование такого математического описания процесса формирования управляющей информации позволяет принципиально снизить объем вычислений и осуществлять управление исполнительными механизмами ТО в реальном масштабе времени.

7.3. Исполнительные механизмы систем управления технологическими объектами

При проектировании систем управления ТО большое значение имеет выбор приводов главного движения. Назначение приводов главного движения подачи в ТО с системой программного управления заключается в том, чтобы обеспечить выполнение ТП с максимальной производительностью при заданных значениях точности и качества.

Точность следящей системы определяет способность системы обеспе-

чивать требуемые условия работы в различных режимах вне зависимости от изменения внешних возмущающих факторов. Точность следящих систем характеризуется динамической и статической ошибками.

Динамическая ошибка — разность между заданным и текущим значениями воспроизводимой величины в период отработки управляющей информации рабочими органами ТО.

Наибольшее значение для СУ имеют динамические ошибки, возникающие при внезапном изменении скорости входного сигнала, например, от нуля до максимума (или, наоборот) за достаточно малое время, сравнимое со временем переходных процессов в СУ. Это происходит, например, при обработке контура в виде угла или дуги окружности малого радиуса.

Точность воспроизведения заданной программы вдоль каждой из координат зависит как от заданной программы (входной функции), так и от статических и динамических характеристик следящего привода, в частности от коэффициентов усиления и быстродействия.

Статическая ошибка — разность между значением выходного параметра (полученного в результате выполнения заданной программы) и значением входного (заданного по программе) параметра в установившемся режиме. Она определяет точность следящих приводов координатных станков, является одной из составляющих погрешности обработки плоских контуров и при объемной обработке. Статическая ошибка складывается из нескольких составляющих, основные из которых:

- ошибка датчика положения;
- ошибка, связанная с наличием люфтов в кинематической цепи между датчиком положения и управляемым органом станка (режущий инструмент, заготовка и т. д.);
- ошибка, вызванная дрейфом нуля усилительного канала;
- ошибка, обусловленная нелинейностью усилительных элементов СУ;
- ошибка, вызванная действием статического момента нагрузки при трогании (усилия трения в направляющих, усилия резания).

Статическая погрешность СУ определяет погрешность многократной установки координаты управляемого объекта в какую-либо точку, т.е. по сути дела она определяет стабильность ее функционирования. Эта ошибка складывается из зоны нечувствительности СУ, дрейфа нуля на выходе преобразователей и т. д.

В настоящее время применяют в основном два вида приводов: на основе следящих систем (как правило, используют высокомоментные двигатели) и на основе шаговых двигателей (ШД).

Шаговые приводы подач являются простейшим вариантом исполнительного привода подач. Их основные показатели следующие:

- полоса пропускания — максимальная частота командных импульсов, обрабатываемых в установившемся режиме на холостом ходу;

- приемистость — наибольшая частота следования командных импульсов, при которой возможны внезапный пуск и останов ШД без потери шага.

Приемистость и полоса пропускания характеризуют быстродействие привода и, следовательно, производительность технологического оборудования.

Шаговые двигатели изготавливают двух видов: маломощные для использования в качестве серводвигателей и силовые для непосредственного привода исполнительного узла без усилителя крутящего момента. Принцип действия ШД напоминает работу поворотного электромагнита. Магнитопроводящий ротор с полюсами стремится повернуться так, чтобы его полюсы оказались в положении наибольшей проводимости магнитного потока, образованного электрическим током, проходящим через одну из трех обмоток секций статора (рис. 7.8). Секции статора имеют аналогичные ротору полюсы, однако эти секции расположены таким образом, что если полюсы одной из них совпадают с полюсами ротора, у двух других они смещены на $\pm 1/3$ шага полюсов.

Шаговый двигатель обеспечивает строго выдерживаемый угол поворота ротора при подводе к его обмоткам постоянного напряжения. Подавать напряжение к разным обмоткам (секциям) статора необходимо в определенной последовательности, зависящей от требуемого направления поворота ротора двигателя. Частота подаваемых на ШД импульсов

изменяет угловую скорость вращения ротора, и при большой частоте наблюдается его непрерывное вращение (необходимо помнить, что ШД можно использовать в разомкнутых системах лишь в пределах их разрешающей способности, если не снабжать систему специальными устройствами плавного разгона и торможения). Разрешающей способностью ШД (частотой приемистости или приемистостью) называют мгновенный перепад частот, отрабатываемый двигателем без пропуска хотя бы одного импульса. Разрешающая способность различных типов отечественных ШД достигает 2000 Гц. При плавном разгоне двигатели могут работать на более высоких частотах, например до 20 000 Гц. Ша-

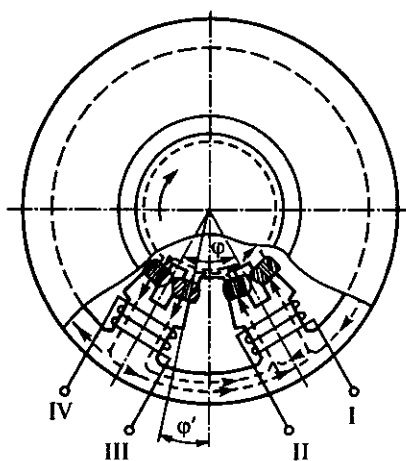


Рис. 7.8. Устройство шагового двигателя:

I, II, III, IV — обмотки статора шагового двигателя

говый двигатель характеризуется динамическим моментом, который имеет значение соответственно разрешающей способности, достигая 0,1 Н·м для ШД, используемых в качестве серводвигателей, и десятков и даже сотен для силовых ШД. Шаг на выходном валу чаще выполняют в $1,5^\circ$, но он может быть равен $0,5-10^\circ$. Ошибка в шаге в зависимости от нагрузки может составить 20 % величины шага, но при работе двигателя она не накапливается. Реверсирование ШД достигается изменением последовательности подключения обмоток статора.

Высокомоментные двигатели имеют возбуждение от постоянных магнитов и поэтому меньше нагреваются по сравнению с обычными. Их изготавливают со встроенным тахогенератором и, по желанию потребителя, датчиком пути и тормозом. Они имеют малую массу и объем. Такие двигатели позволяют отказаться от использования механических редукторов, их можно непосредственно соединять, например, с шариковым ходовым винтом исполнительного узла. В сочетании с цепью адаптивного регулирования частоты вращения с помощью тиристорного преобразователя частота сохраняется постоянной и при 1 об/мин. Таким образом, динамические характеристики двигателей позволяют обеспечивать высокую точность обрабатываемых деталей. Ускоренный ход исполнительного узла сокращает вспомогательное время при обработке.

Необходимо отметить, что малоинерционные двигатели требуют специального динамического согласования с механической системой станка. Если собственная частота двигателя и частота механической системы станка будут соизмеримы, это может привести к потере устойчивости всей системы электромеханического привода. Из этого следует, что более рациональный путь повышения быстродействия двигателя связан с увеличением динамического момента при неизменном моменте инерции якоря машины. Двигатели подобного типа получили название высокомоментных. Конструктивная особенность таких двигателей (возбуждение от постоянных магнитов) позволяет отказаться от электромагнитного возбуждения, что исключает потери на нагрев обмотки возбуждения, на 10...15 % увеличивает КПД и уменьшает размеры двигателя. Применение постоянных магнитов позволяет построить многополюсную машину постоянного тока, упрощающую коммутацию и обеспечивающую равномерное распределение магнитной индукции в зазоре. Двигатели обеспечивают равномерное вращение при частотах до 0,1 об/мин. Электромагнитный момент двигателя постоянного тока зависит от величины магнитного потока и тока якоря.

Для создания высокого динамического момента необходимо, чтобы при всех значениях тока якоря I_a магнитный поток оставался постоянным. В машинах постоянного тока с электромагнитным возбуждением магнитный поток уменьшается вследствие размагничивающего действия реак-

ции якоря. Двигатели с постоянными магнитами имеют более стабильный магнитный поток, но и они могут быть размагничены при протекании по якорю больших токов. Во избежание этого намагничивающая сила постоянного магнита должна быть достаточно велика.

Все эти обстоятельства определяют конструкцию магнитной системы высокомоментных двигателей. Магниты из сплава альнико имеют большую длину по оси намагничивания. Высокое значение индукции позволяет получить достаточный магнитный поток при малом сечении магнита. Такие магниты располагают тангенциально по отношению к окружности якоря и снабжают их полюсными наконечниками из магнитомягкого материала. Ферритовые магниты, напротив, имеют очень малую длину, поскольку они создают высокую напряженность поля и имеют большую площадь сечения. Они сами образуют полюсы магнитной системы. Низкая стоимость ферритовых магнитов и очень простая конструкция двигателя обеспечили их широкое распространение. Созданы высокоэнергетические магнитные материалы на основе редкоземельных элементов. Наиболее перспективны самарийкобальтовые ферриты. Удельная энергия их примерно в 3–4 раза выше, чем у сплавов альнико.

Кроме того, для создания высокомоментных двигателей необходимо улучшить условия коммутации. Этого можно добиться, если уменьшить ЭДС коммутируемой секции путем увеличения числа пластин коллектора. Применяют также специальные контактные щетки, выдерживающие большие плотности тока. Все эти меры обеспечивают 6...10-кратную перегрузку по моменту при низких частотах вращения в течение 20...30 мин. Это обеспечивается наличием массивного якоря и большой тепловой инерционностью двигателя. При повышении частоты вращения коммутация двигателя ухудшается и перегрузочная способность снижается.

Высокомоментные двигатели относительно тихоходны. Номинальная частота вращения составляет обычно 1000 об/мин (ее можно повысить до 2000 об/мин за счет кратковременной форсировки напряжения якоря). Эти двигатели не нуждаются в промежуточном редукторе и их устанавливают непосредственно на ходовой винт механизма подачи станка. Типичная конструкция высокомоментного двигателя с ферритовыми магнитами представлена на рис. 7.9. Ферритовые сегменты 8 многополюсной магнитной системы расположены в цилиндрическом корпусе 7 и охватывают якорь 6. На валу двигателя расположен коллектор 5 со щетками 4. Двигатель снабжен электромагнитным тормозом 9 и встроенным тахогенератором 3. Для осуществления обратной связи по перемещению предусматривается резольвер 2, который связан с валом двигателя прецизионной повышающей передачей 1. Конструкция двигателя допускает применение внешнего вентилятора типа «наездник».

Дальнейшим развитием исполнительных электродвигателей посто-

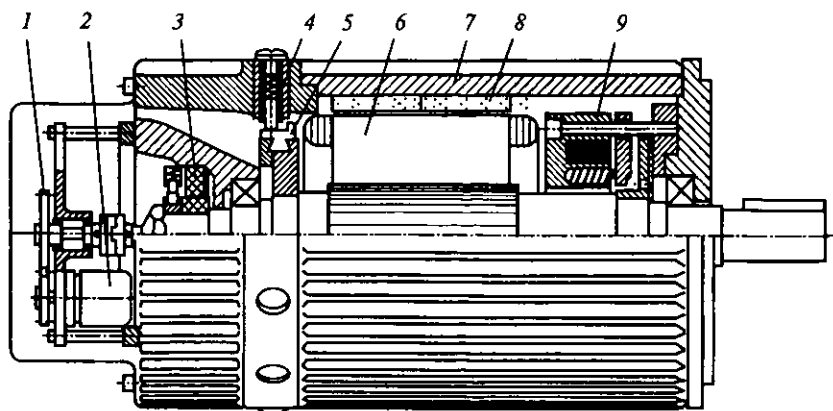


Рис. 7.9. Устройство высокомоментного двигателя:

- 1 — повышающая передача; 2 — резольвер; 3 — встроенный тахогенератор; 4 — щетки; 5 — коллектор; 6 — якорь двигателя; 7 — корпус; 8 — ферритовые сегменты; 9 — электромагнитный тормоз

янного тока являются вентильные бесконтактные электродвигатели, в которых коммутация осуществляется полупроводниковыми приборами. Это позволяет избавиться от коллектора и щеток и существенно улучшить динамические свойства машины. Вентильный бесконтактный двигатель постоянного тока напоминает двигатель с механическим коллектором. Для удобства управления обмотку якоря располагают на неподвижной части машины — статоре, а на роторе — постоянные магниты, которые создают поток возбуждения.

Мощность электропривода, кВт

$$N = 10,2 M n, \quad (7.14)$$

где M — момент на валу двигателя, Н·м; n — число оборотов вала двигателя, с⁻¹.

Для преобразования вращательного движения в поступательное в точных приводах ТО применяют передачу «винт — гайка качения». В корпусе передачи помимо гайки находятся шарики, которые перемещаются между гайкой и винтом по замкнутому контуру. Шарики позволяют затянуть гайку таким образом, чтобы исключить зазор в передаче. Без них при такой затяжке винт невозможно было бы прокрутить.

Величину продольного усилия F , Н, передаваемого гайкой, можно определить по формуле

$$F = \frac{2\pi M 1000}{h}. \quad (7.15)$$

Здесь h — шаг ходового винта, мм.

Для осуществления поступательного движения в станках используют

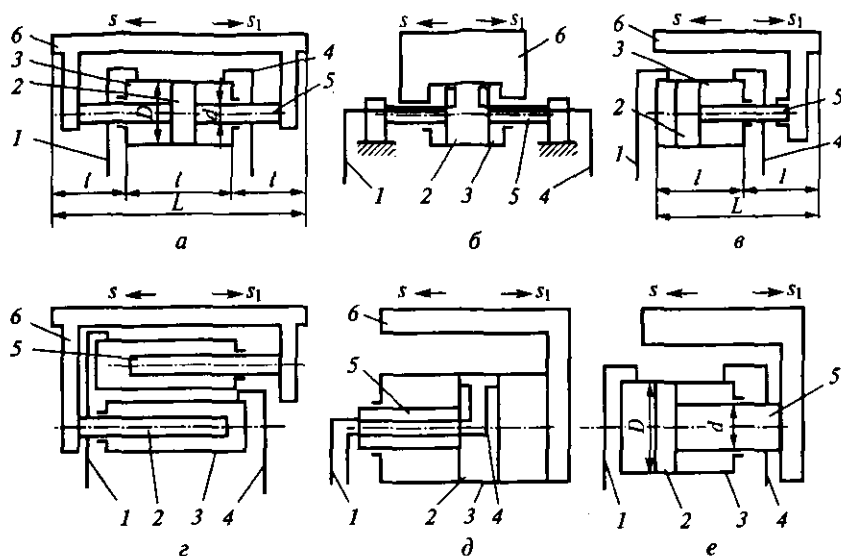


Рис. 7.10. Схема гидроцилиндров:

a — с подвижными штоками; *б* — с неподвижными штоками; *в* — с односторонним штоком малого диаметра; *г* — с плунжерами; *д* — с односторонним штоком большого диаметра; *е* — дифференциального; 1 — первый трубопровод; 2 — поршень; 3 — цилиндр; 4 — второй трубопровод; 5 — шток; 6 — исполнительный рабочий орган станка

гидро- и пневмоцилиндры. По конструкции их можно разделить на цилиндры с двусторонним штоком, с односторонним штоком и с плунжером.

На рис. 7.10 приведены схемы гидроцилиндров, обеспечивающих возвратно-поступательное движение исполнительного рабочего органа *б* станка (стол, суппорт, ползун). Движение осуществляется при подаче масла к поршням 2 (по трубопроводам 1 или 4 в цилиндр 3).

Стол *б* (рис. 7.10, *a*) совершает движения в противоположные стороны с одинаковыми скоростями (ходами). Корпус цилиндра 3 неподвижен. Штоки 5, имеющие одинаковые диаметры d , работают на растяжение. Это позволяет сделать штоки небольшого диаметра. Однако здесь требуется точно изготовить цилиндр, выполнить двойные уплотнения штоков и уплотнения поршня. Кроме того, возрастает длина $L = 3l$, где l — длина хода поршня 2.

Для того чтобы обеспечить свободный выход воздуха из полостей, масло по трубопроводам 1 и 4 подают в цилиндр в верхних точках. Если при движении вправо и влево в цилиндр поступает равное количество масла в единицу времени (расход масла), то скорость движения стола *б*

$$S_1 = S_2 = \frac{1000Q}{0,785 \cdot 60(D^2 - d^2)}, \quad (7.16)$$

где Q — расход масла, поступающего в цилиндр, л/мин; D — диаметр цилиндра мм; d — диаметр штока, мм; S_1 — скорость движения влево, мм/с; S_2 — скорость движения вправо, мм/с.

Такие цилиндры применяют главным образом в станках шлифовальной группы.

В цилиндрах, выполняемых по схеме рис. 7.10, б, шток неподвижно закреплен на станине, а корпус жестко связан со столом б станка. Масло в цилиндр поступает через отверстия в штоке.

Гидроцилиндр, показанный на рис. 7.10, в, имеет односторонний тонкий шток, что позволяет значительно уменьшить размеры цилиндра и получить приблизительно одинаковые скорости движения в обе стороны. Эти цилиндры используют в станках, где шток работает на растяжение.

Для упрощения технологии изготовления цилиндров и уменьшения стоимости агрегата цилиндры выполняют так, как показано на рис. 7.10, г. В этом случае внутреннюю поверхность цилиндров не обрабатывают. Плунжеры 2 и 5 выполняют пустотелыми, и если они имеют одинаковый диаметр, скорость перемещения стола в обе стороны одинакова. Длина хода стола б при таких конструкциях цилиндра может достигать 8 м.

В многорезцовых и копировальных токарных полуавтоматах, а также в агрегатных станках для перемещения силовых головок применяют цилиндры, выполненные по схеме рис. 7.10, д. Здесь корпус цилиндра 3 жестко связан с рабочим органом станка, а шток, через который подводится масло, жестко закреплен на станине.

Если необходимо получить одинаковые скорости движения штока в обе стороны, применяют дифференциальные цилиндры (рис. 7.10, е), в которых при движении поршня 2 влево правая полость соединяется с напорной магистралью, а левая — со сливной, а при движении вправо обе полости через распределитель соединяются с напорной магистралью. При этом масло, вытесняемое из правой полости, поступает в левую полость вместе с маслом, подаваемым насосом. Такие цилиндры применяют в хонинговальных станках.

При движении поршня влево скорость перемещения

$$S_1 = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)}. \quad (7.17)$$

При движении поршня вправо (выдерживая условия дифференциальности) скорость перемещения

$$S_2 = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} + \frac{S_2 \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{4Q}{\pi D^2} + \frac{S_2(D^2 - d^2)}{D^2};$$

$$S_2 \pi D^2 = 4Q + S_2 \pi (D^2 - d^2),$$

откуда

$$S_2 = \frac{4Q}{\pi d^2}. \quad (7.18)$$

В случае необходимости обеспечения постоянства скорости влево и вправо ($S_1 = S_2$) при постоянной величине расхода Q взаимосвязь величин диаметров гидроцилиндра и штока можно определить по формуле

$$\frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4Q}{\pi (D^2 - d^2)},$$

откуда

$$D = d\sqrt{2}.$$

Если в дифференциальном цилиндре уменьшить диаметр штока 5, можно получить очень высокую скорость. Такую конструкцию используют в протяжных, поперечно-строгальных и долбежных станках.

Эффективная (полезная) мощность насоса, кВт, используемого в гидросистеме

$$N_{\text{эф}} = P Q / 6120, \quad (7.19)$$

где P — рабочее давление в гидросистеме, создаваемое насосом, Па; Q — производительность насоса, л/мин.

Типовая конструкция пневмоцилиндра приведена на рис. 7.11. Основной деталью цилиндра является труба (гильза) 1, изготавливаемая из стали 45. Торцовые поверхности трубы закрыты крышками 5, изготовленными из стали или чугуна. Соединение крышек 5 и гильзы уплотняют круглыми резиновыми кольцами 4. Внутри гильзы помещен чугунный поршень

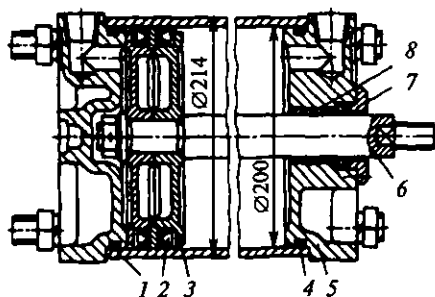


Рис. 7.11. Схема пневмоцилиндра:

1 — гильза; 2 — поршневые манжеты; 3 — поршень; 4 — резиновые кольца; 5 — крышки; 6 — шток; 7, 8 — втулки

шень 3, который прикреплен к штоку 6 гайкой. Стальной шток 6 опирается на втулку 8. Уплотнение штока соединения с крышкой обеспечивается манжетами, прижимаемыми втулкой 7. Силу прижима можно регулировать прокладками. Для уплотнения сопряжений между поршнем 3 и гильзой служат поршневые манжеты 2 или чугунные поршневые кольца.

Усилие, развиваемое на штоке гидро- или пневмоцилиндра, можно определить по формуле

$$F = P \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \quad (7.20)$$

где F — величина силы, Н; P — давление в системе, Па.

7.4. Измерительные устройства, датчики обратной связи

В системах управления ТО для получения необходимой информации о параметрах протекающего ТП используют различные датчики.

Различают датчики перемещения, положения, скорости, ускорения и т. д. По способу получения информации датчики подразделяют на дискретные, фазовые и амплитудные; по способу преобразования информации — на контактные и бесконтактные (емкостные, фотоэлектрические, индуктивные и др.). По конструкции датчики подразделяют на линейные и роторные. Роторные датчики кинематически связаны с выходным валом двигателя и осуществляют косвенное измерение величины перемещения рабочего органа ТО (например, в станках с ЧПУ). Линейные датчики, расположенные на неподвижной (относительно измеряемого перемещения) части ТО (например, станине станка), производят прямое измерение линейных перемещений рабочего органа.

Датчик является измерительным прибором. Дискретность (цена одного импульса) зависит как от самого датчика, так и от устройств, с которыми он связан. Точность датчика определяется конструктивными особенностями самого датчика, структуры электронной схемы преобразователя его сигнала, ее помехозащищенности и др.

При создании преобразователей сигнала датчика используется большое количество различных схмотехнических решений. Вместе с тем, как показывает практика последних лет, наибольший вклад в развитие цифровых преобразователей перемещений (ЦПП) вносит микроэлектроника, применение которой позволяет кардинально решить проблему технологичности, обеспечив максимальное упрощение, как правило, прецизионных механических узлов. Поэтому современный ЦПП состоит из относительно простого, насколько это возможно для обеспечения за-

данной точности, электромеханического первичного преобразователя, непосредственно воспринимающего измеряемое перемещение, и вторичного преобразователя — электронного узла, обрабатывающего полученную информацию и представляющую ее в цифровой форме.

Основными характеристиками датчика являются следующие параметры: чувствительность датчика — отношение изменения ΔY выходного сигнала к изменению ΔX контролируемой величины

$$\epsilon = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (7.21)$$

и разрешающая способность датчика — наименьшая величина контролируемого параметра, фиксируемая датчиком.

В настоящее время широкое распространение получили фотоэлектрические преобразователи, в которых использован принцип модуляции светового потока с помощью растрового сопряжения. В зависимости от величины расположения в пространстве линейки и диафрагмы растровое сопряжение может быть нониусным, обтюрационным или муаровым.

Оптическая форма представления информации сигнала наиболее удобна для отображения величины угла поворота вала, так как съем информации не нагружает вал каким-либо моментом, а точность элементов оптических преобразователей может быть достигнута весьма высокой. Цифровая форма представления информации гарантирует высокую точность и помехоустойчивость.

Работа фотоэлектрической части формирователей (преобразователей) основана на использовании явления фотоэффекта, возникающего при попадании светового потока, прошедшего через прозрачные участки кодовых шкал, на фотоэлементы, преобразующие изменение светового потока в фототок, служащий исходным электрическим сигналом для последующих схем. Такие преобразователи получили широкое распространение, так как при относительно небольших размерах позволяют добиться высокой точности преобразования информации. Если на диск нанесена маска, соответствующая одному из кодов, применяемых для повышения помехоустойчивости и надежности считывания, то в схеме предусматривают декодирующее устройство, преобразующее этот код в обычный, двоичный код.

Кодирующие диски фотоэлектрических преобразователей выполняют из оптического стекла, на которое фотохимическим способом наносят маску в виде концентрических дорожек с прозрачными и непрозрачными для светового излучения участками.

Количество таких дорожек и ширина кодовых участков определяют разрешающей способностью преобразователей и видом выбранного кода. При кодировании устанавливается соответствие между каждым

уровнем квантования и некоторой кодовой комбинацией или группой. Кодирование ведется либо по методу последовательного счета элементарных приращений преобразуемого сигнала, либо по методу позиционного считывания кода, формируемого для каждой выборки преобразуемого сигнала.

При кодировании по методу позиционного считывания кодовые комбинации для всех уровней шкалы воспроизведены заранее. При этом преобразователь должен иметь число кодовых дорожек, равное разрядности считываемого двоичного числа.

Оптические преобразователи угловых и линейных величин в цифровую форму делят на две основные группы: последовательного счета штрихов и позиционного считывания кодов по кодовой маске.

Точность в первой группе ограничивается числом штрихов на измерительной линейке или лимбе, во второй группе — числом кодовых дорожек, соответствующих числу разрядов.

Повышение точности достигается использованием системы штрихов на двух лимбах, образующих растровый интерполятор. Растровый принцип основан на появлении муаровых колец, расположение которых вдоль направления штрихов позволяет проводить интерполяцию в увеличенном масштабе по сравнению с расстоянием между штрихами. Обычно в растровом интерполяторе производится измерение фазы периодической функции освещенности муаровой полости по методу позиционного считывания. Число муаровых полос, измеренное по методу последовательного счета, также может нести информацию об опорных точках функции, подлежащей последующей интерполяции.

Преобразователи, использующие метод последовательного счета числа приращений непрерывного сигнала, можно разделить на два типа — циклические и накапливающие.

Преобразователь накапливающего типа реагирует не угловое положение, а приращение углового положения вала. При этом реверсивный счетчик, присоединенный к преобразователю, управляется сигналами с нескольких фотоприемников, позволяющих учесть направление вращения вала, а угол поворота определяется по алгебраической сумме импульсов, принятых счетчиком.

При кодировании линейного перемещения используют широко применяемые в оптике дифракционные решетки, разрешающая способность которых в настоящее время достигает 1000 штрихов на 1 мм и выше.

Преобразователи позиционного растрового считывания имеют кодовую шкалу, механически связанную с входным валом, и набор фотоэлементов. Цифровой код, сформированный на выходе преобразователя, снимается с фотоэлементов для последующей обработки. Преобразователи считывания подразделяют на две подгруппы — параллельного и пос-

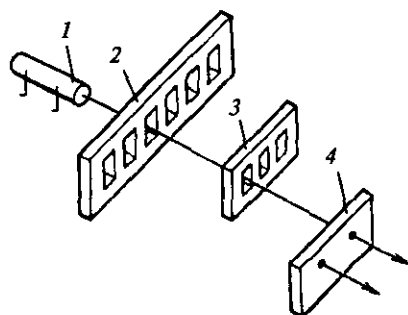


Рис. 7.12. Схема фотоэлектрического преобразователя:

1 — источник света; 2 — линейка с рисками; 3 — диафрагма (шторка); 4 — блок фотоэлементов

последовательного считывания. Разница между ними заключается в том, что при параллельном считывании производится одновременный опрос фотоэлементов, а при последовательном считывании — последовательный.

Устройство фотоэлектрического преобразователя перемещений представлено на рис. 7.12. Линейка 2 является неподвижным элементом датчика и жестко связана с неподвижным элементом станка. Источник света 1, диафрагма 3 и блок фотоэлементов 4 жестко связаны между собой и образуют подвижную часть датчика, установленную на подвижном элементе станка с ЧПУ, перемещение которого контролируется. На линейке равномерно нанесены штрихи, образующие непрозрачные и прозрачные для света зоны, через которые свет свободно проходит. Параллельно линейке расположена диафрагма с четырьмя группами рисок, имеющих такие же геометрические параметры, как и на линейке, но по фазе каждая группа имеет сдвиг относительно друг друга, равный $\pi/2$. Против каждой группы элементов расположен фотоэлемент. Таким образом, если первый фотоэлемент максимально освещен (риски линейки совпадают с рисками шторки), то третий будет полностью затемнен (прозрачные области линейки совпадают с непрозрачными областями шторки) вследствие сдвига третьей группы рисок относительно первой на фазу π ($\pi/2 + \pi/2$).

При равномерном перемещении диафрагмы выходные напряжения фотоэлементов будут меняться следующим образом. Сигналы с фотоэлементов суммируются попарно U_1 и U_3 ; U_2 и U_4 . Эта операция позволяет избежать влияния изменения яркости источника света на постоянную составляющую сигнала. При синхронном изменении освещенности фотоэлементов меняется только амплитуда пилообразного напряжения. При этом постоянный ток фотоэлементов (остаточный или темновой ток) взаимокompенсируется.

Преобразование сигналов с фотоприемников осуществляется двумя способами — фазовым или на основе прямого отсчета.

В фазовых преобразователях происходит опрос каждого фотоэlemen-

та, а полученные сигналы суммируются. Сигналы на разных этапах его преобразования представлены на рис. 7.13.

При смещении шкалы на величину одной фазы сигнал также смещается на фазу (2π). Структурная схема формирователя импульсов показана на рис. 7.14. Выходная информация формируется в виде импульсов (выход B^+ или B^- в зависимости от направления движения). Импульсы с генератора импульсов поступают на делитель частоты и одновременно на суммирующее (+) и вычитающее (–) устройства. С делителя частоты импульсы поступают на датчик, с которого полученный сигнал поступает на интегратор, затем через триггер на первый вход фазового дискриминатора. Одновременно с выхода устройства вычитания импульсы через делитель частоты, идентичный первому, поступают на его второй вход. При наличии перемещения рабочего органа на выходе датчика входящие импульсы получают фазовый сдвиг, который регистрируется фазовым дискриминатором. Соответствующая информация формируется на выходах B^+ и B^- .

Таким образом, за один оборот вала датчика формируется количество импульсов

$$n_{\text{имп}} = m K_{\text{дел}}, \quad (7.22)$$

где $n_{\text{имп}}$ — количество импульсов за один оборот; m — число штрихов; $K_{\text{дел}}$ — коэффициент деления делителей.

На датчик поступают импульсы с частотой

$$F_{\text{зп}} = F_{\text{генер}} / (4 K_{\text{дел}}). \quad (7.23)$$

Здесь $K_{\text{дел}}$ — коэффициент деления преобразователя сигнала датчика.

Из условия допустимой динамической ошибки отклонение частоты от частоты запитки ($F_{\text{зп}}$) составляет не более 10 % ($0,1 F_{\text{зп}}$), следовательно, за 1 с можно получить число импульсов $n_{\phi} = 0,1 F_{\text{зп}}$, откуда число оборотов $n_{\text{мах}}$, об/с, вала датчика (максимальное) можно представить как

$$n_{\text{мах}} = n_{\phi} / K_{\text{шк}}, \quad (7.24)$$

где $K_{\text{шк}}$ — количество штрихов на шкале датчика.

Максимальная частота информации, поступающей на преобразователь сигнала привода с датчика,

$$F_{\text{мах}} = n n_{\phi} K_{\text{дел}}. \quad (7.25)$$

При определении коэффициента деления $K_{\text{дел}}$ необходимо учитывать точность изготовления шкалы и других элементов датчика. Величина дискреты внутри одного шага шкалы должна быть больше величины ее неравномерности, т. е. должно выполняться неравенство

$$\Delta L / K_{\text{дел}} \geq \delta. \quad (7.26)$$

Здесь ΔL — шаг шкалы датчика; δ — максимальное значение погрешности шкалы датчика.

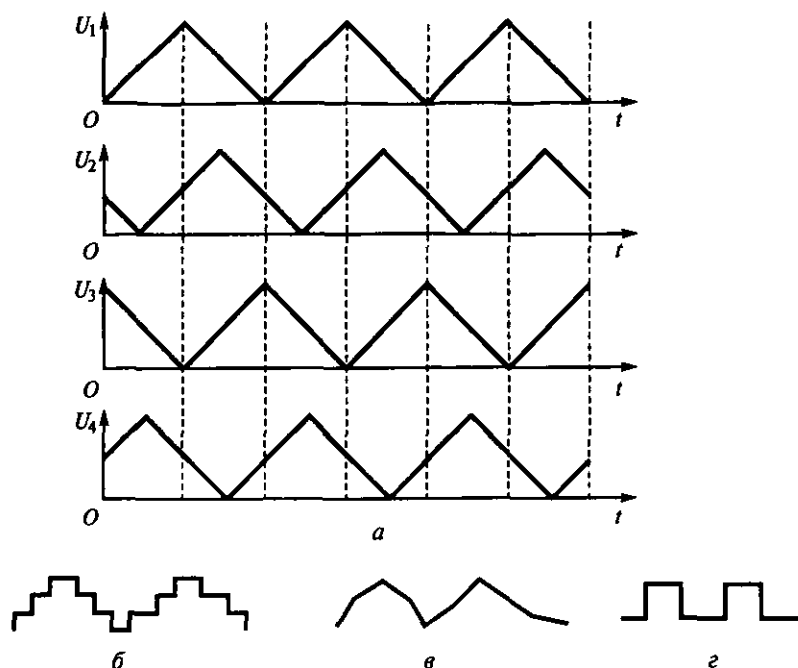


Рис. 7.13. Форма выходных сигналов преобразователя перемещений на этапе:

a — модулирования светового потока; *б* — опроса фотоэлементов; *в* — после интегрирования; *г* — после прохождения сигнала через триггер

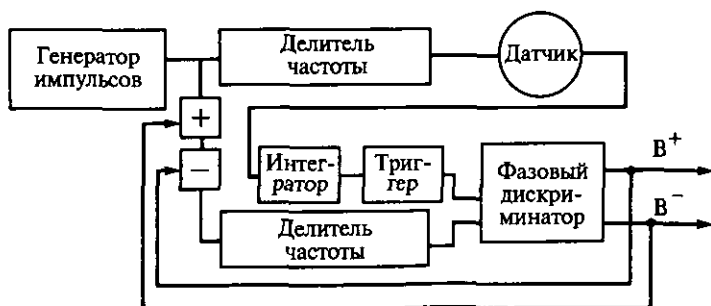


Рис. 7.14. Структурная схема преобразователя сигналов датчика обратной связи

Максимальная частота вращения вала датчика ограничена частотой импульсов с датчика (определяется скоростью перемещения) и не должна превышать частоту опорных импульсов с генератора. При этом должно выполняться следующее условие:

$$F_{\text{шк}} < F_{\text{зап}}, \quad (7.27)$$

где $F_{\text{шк}}$ — частота следования импульсов от шкалы датчика; $F_{\text{зап}}$ — частота запитки электронных ключей опроса фотоприемников датчика ($F_{\text{зап}} = F_{\text{ген}} / K_{\text{дел}}$).

Если датчик роторного типа, то максимальная частота вращения вала датчика

$$n_{\text{об. в. датчика}} n_{\text{шк}} < F_{\text{зап}}. \quad (7.28)$$

Здесь $n_{\text{шк}}$ — число штрихов шкалы датчика.

При отсутствии движения подвижного элемента датчика функция, описывающая выходной сигнал с фотоприемников, имеет вид

$$f_0(t) = C, \quad (7.29)$$

где C — некоторая постоянная величина, определяемая текущим положением вала датчика.

Функция, описывающая выходной сигнал после интегрирующего устройства, имеет вид

$$\int f_0(t) dt = C + X, \quad (7.30)$$

где X — переменная, линейно зависящая от времени.

Функция (7.30) представляет собой отрезок прямой линии, имеющей некоторый (определяемый коэффициентом C) наклон к горизонтальной оси времени. В этом случае динамическая ошибка отсутствует.

При вращении вала датчика функция, описывающая выходной сигнал фотоприемников, имеет вид:

в случае равномерного движения

$$f_1(t) = C_1 + X^2 / 2, \quad (7.31)$$

в случае равноускоренного движения

$$f_2(t) = C_2 + X^3 / 3. \quad (7.32)$$

При этом возникает динамическая ошибка, обусловленная нелинейностью получаемого сигнала. Эта ошибка сильнее проявляется при обработке криволинейного участка контура и меньше в случае перемещения по прямолинейному участку. В связи с этим при холостых ходах, обработке прямолинейных участков можно допускать большую величину контурной скорости (большую девиацию частоты), а при обработке криволинейных поверхностей — меньшую (в зависимости от требуемой точности). Таким образом, формулу (7.28) можно представить в следующем виде:

$$n_{\text{об. в. датчика}} < F_{\text{ген}} 100 / (n_{\text{шк}} K_{\text{дел}} M), \quad (7.33)$$

где M — максимально допустимая девиация частоты, определяемая требуемой точностью отработки командной информации, %. Для данной схемы преобразования величина девиации не может превышать 100 %.

При прямом методе преобразования сигнала фотоэлектрические датчики содержат модулятор светового потока, который формирует два гармонических сигнала, сдвинутых на угол $\pi/2$. Выходные электрические сигналы в этом случае должны соответствовать следующим выражениям:

$$\begin{aligned} U_A(\varphi) &= U \sin(\varphi) + U_{\text{см}}; \\ U_B(\varphi) &= U \cos(\varphi) + U_{\text{см}}. \end{aligned} \quad (7.34)$$

Здесь $U_A(\varphi)$ — текущее значение сигнала первой фазы; $U_B(\varphi)$ — текущее значение сигнала второй фазы; U — амплитудное значение выходных сигналов; φ — текущее значение угла поворота вала датчика; $U_{\text{см}}$ — напряжение смещения.

Однако практически из-за погрешностей изготовления элементов узла модулятора, различий в характеристиках электронных преобразовательных элементов реальные сигналы будут описываться следующими выражениями:

$$\begin{aligned} U_{Ap}(\varphi) &= U_1 \sin(\varphi) + U_3; \\ U_{Bp}(\varphi) &= U_2 \cos(\varphi + \Delta\varphi) + U_4, \end{aligned} \quad (7.35)$$

где $U_{Ap}(\varphi)$ — текущее значение реального сигнала первой фазы; $U_{Bp}(\varphi)$ — текущее значение реального сигнала второй фазы; U_1, U_2 — произвольные амплитудные значения соответственно сигналов первой и второй фаз; U_3, U_4 — произвольные значения смещений фазовых сигналов.

В результате несоответствия реальных сигналов требуемым сигналам происходит искажение выходных сигналов, что приводит к снижению точности отсчета и надежности работы преобразовательного устройства. Для устранения этого недостатка используют схемное решение, позволяющее путем проведения дополнительных преобразований получаемых сигналов ликвидировать это несоответствие. В этом случае сигнал второй фазы формируют путем суммирования сигналов первой фазы, взятый с некоторым коэффициентом, и второй фазы. На этом этапе сигналы описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} U_A &= U_1 \sin(\varphi) + U_3; \\ U_{1B} &= U_2 \cos(\varphi + \Delta\varphi) + U_4 \pm (k U_1 \sin(\varphi) + U_3) = U_5 \cos(\varphi) + U_6, \end{aligned} \quad (7.36)$$

где k — коэффициент изменения сигнала первой фазы.

Далее выполняется выравнивание коэффициентов передач сигналов первой и второй фаз. На этом этапе сигналы описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} U_{2A} &= (U_1 \sin(\varphi) + U_3) k_1 = U \sin(\varphi) + U_7; \\ U_{2B} &= (U_5 \cos(\varphi) + U_6) k_2 = U \cos(\varphi) + U_8. \end{aligned} \quad (7.37)$$

Здесь k_1 и k_2 — регулируемые коэффициенты усиления усилителей.

На заключительном этапе преобразований осуществляется исключе-

ние постоянной составляющей за счет добавления напряжения U_9 и U_{10} соответственно в сигналы первой и второй фаз:

$$\begin{aligned} U_{3A} &= U \sin(\varphi) + U_7 \pm U_9 = U \sin(\varphi); \\ U_{3B} &= U \cos(\varphi) + U_8 \pm U_{10} = U \cos(\varphi). \end{aligned} \quad (7.38)$$

Формирование выходных импульсных сигналов осуществляется с помощью триггеров согласно следующим выражениям:

$$U_{4A} = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{3A}(\varphi) \geq U_{\text{оп1}}, \\ 0 & \text{при } U_{3B}(\varphi) < U_{\text{оп1}}; \end{cases} \quad (7.39)$$

$$U_{4B} = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{3B}(\varphi) \geq U_{\text{оп1}}, \\ 0 & \text{при } U_{3B}(\varphi) < U_{\text{оп2}}, \end{cases}$$

где $U_{\text{оп1}}$ — пороговое напряжение первого триггера; $U_{\text{оп2}}$ — пороговое напряжение второго триггера.

Осуществляемое таким образом формирование импульсного сигнала обеспечивает высокое быстродействие, которое определяется только характеристиками логических элементов. В этом заключается достоинство метода прямого преобразования сигналов по сравнению с другими методами, например с фазовым методом преобразования. Число отсчетов при таком преобразовании определяется количеством дискрет линейки датчика.

Существенно увеличить разрешающую способность датчика можно путем введения дополнительных преобразований сигналов первой и второй фаз. С этой целью оба аналоговых сигнала преобразуются в цифровой код. Далее в цифровом виде сигналы подаются на блок, осуществляющий деление синусного сигнала на косинусный, в результате чего получается новая функция — тангенс текущего угла. Производя расчет обратной тригонометрической функции — арктангенса, получаем текущее значение угла поворота φ вала датчика.

$$\varphi = \arctg(A(\varphi)/B(\varphi)).$$

Таким образом, формирование информации о текущем значении угла поворота вала датчика осуществляется параллельно двумя способами. Первый способ, с меньшим разрешением, заключается в подсчете непосредственно импульсов, формируемых при переходе гармонических сигналов первой и второй фаз через порог срабатывания порогового устройства (компаратора, триггера). Здесь определение величины перемещения осуществляется в относительной системе — величина перемещения опре-

деляется суммой импульсов, поступивших с выхода порогового устройства. Второй способ, с большим разрешением, заключается в математической обработке текущих значений выходных сигналов первой и второй фаз. В этом случае определение величины перемещения осуществляется в абсолютной системе (в пределах фазы датчика).

Математическая обработка текущих значений выходных сигналов требует затрат времени, которого может не хватать при высоких скоростях вращения вала датчика (быстрое перемещение контролируемого рабочего органа ТО). В этом случае для формирователя выходного сигнала датчика используется информация, сформированная только первым способом. Такой подход оправдан тем, что при увеличении скорости перемещения рабочего органа ТО снижаются требования к точности определения его текущего положения.

При малых величинах перемещений рабочего органа ТО, когда возрастают требования к точности определения его текущего положения, формирование информации о положении осуществляется одновременно двумя способами.

Применение второго способа становится особенно актуальным при формировании сигнала о скорости перемещения рабочего органа ТО в цифровой форме без использования тахогенератора (резольвера). При таком подходе формирование сигнала о скорости ω при малых скоростях перемещения определяется как величина изменения углового положения вала датчика за фиксированный период времени Δt

$$\omega = \frac{\psi_1 - \psi_2}{\Delta t}, \quad (7.40)$$

где ψ_1, ψ_2 — начальное и конечное положения вала датчика на отрезке времени Δt .

В этом случае упрощается конструкция привода за счет исключения из его состава аналогового тахогенератора, который, как правило, на малых скоростях имеет низкую точность формирования сигнала о скорости.

7.5. Формирование сигнала обратной связи

На основе получаемой с преобразователей перемещений сигналов формируется сигнал рассогласования. Структурная схема преобразователя сигнала управления приводом приведена на рис. 7.15. На входы модуляторов подаются тактовая частота с генератора — $F_{\text{ген}}$, сигналы с соответствующих выходов блока управления (командная информация) и сигналы с датчика обратной связи. Полученные сигналы поступают на входы делителей частоты с одинаковыми коэффициентами деления K . Фазовый дискриминатор формирует сигналы в соответствии с фазовым сдви-

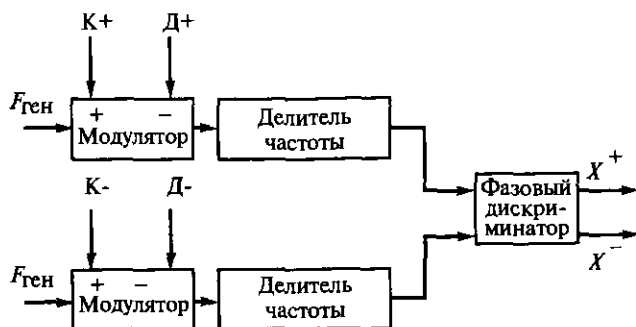


Рис. 7.15. Структурная схема преобразователя сигнала управления приводом

гом. Фазовый сдвиг образуется с появлением командных импульсов или импульсов с датчика обратной связи, причем командные импульсы и импульсы с датчика определяют знак фазового сдвига.

Каждый добавленный (или вычитенный) импульс вызывает сдвиг по фазе на $1/K$ периода сигнала с делителей относительно друг друга, т. е.

$$\Delta\varphi = \frac{T_{\text{дел}}}{K}, \quad (7.41)$$

где $T_{\text{дел}}$ — период следования импульсов с делителей частоты.

При подаче командной информации происходит «вписывание» импульсов в соответствующий канал. Компенсировать полученный фазовый сдвиг можно путем вычитания из этого же канала такого же числа импульсов с датчика. Таким образом, командная информация вызывает появление сигнала на выходе фазового дискриминатора, который управляет приводом. Датчик обратной связи формирует информацию об этой отработке и компенсирует фазовый сдвиг.

Недопустимым для данной схемы является случай, когда фазовый сдвиг сигналов превысит полную фазу. В этом случае происходит потеря информации, т. е. за каждый период сигнала с делителей может быть прибавлено (вычтено) число импульсов не более K :

$$n < K. \quad (7.42)$$

Здесь n — число прибавленных (вычитенных) импульсов за период.

Следовательно, максимальная частота командных (или с датчика обратной связи) импульсов

$$F_{\text{max}} < F_{\text{ген}}. \quad (7.43)$$

Для расширения технических возможностей ТО необходимо увеличивать тактовую частоту и коэффициент деления делителей. Однако повышение тактовой частоты ограничено электрическими параметрами

применяемых элементов, а с увеличением коэффициента деления уменьшается частота импульсов с дискриминатора и при частоте ниже 200 Гц происходит нарушение плавности работы привода.

7.6. Моделирование систем управления технологическими объектами

Особенность СУ ТО состоит в том, что ее выходные параметры

$$H_i(t) = |H_1(t), H_2(t), \dots, H_m(t)|^T$$

не определяются однозначно входными

$$G(t) = |G_1(t), G_2(t), \dots, G_q(t)|^T,$$

а зависят от ряда переменных, определяемых ее собственными характеристиками

$$Z(t) = |Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_n(t)|^T.$$

Выходные параметры СУ ТО определяют как

$$H_i(t) = \Phi_i[Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_n(t); G_1(t), G_2(t), \dots, G_q(t); t], \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (7.44)$$

где $H_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, m$ — параметры, характеризующие функционирование СУ и представляющие интерес для проектировщика СУ ТО; τ — знак транспонирования; $G_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, q$ — воздействия, влияющие на поведение объекта; Φ_i — однозначные функции.

Изменение $H_i(t)$ на интервале (t_0, t_k) определяется изменением $G(t)$ на том же интервале, и начальными условиями $Z_1(t_0), Z_2(t_0), \dots, Z_n(t_0)$, т. е.

$$H_i(t) = \Phi_i[Z_1(t_0), Z_2(t_0), \dots, Z_n(t_0); G_1(t_0, t_k), G_2(t_0, t_k), \dots, G_q(t_0, t_k); t], \quad (7.45)$$

$$i = 1, 2, \dots, P; t \in (t_0, t_k)$$

Минимальное число n переменных Z_i , которые позволяют, согласно уравнениям (6.44) и (6.45), однозначно выразить выходные параметры СУ H_i ($i = 1, 2, \dots, m$) через ее входные G_i ($i = 1, 2, \dots, q$) и время t , представляют собой переменные состояния СУ. Состояние СУ содержит всю информацию о прошлом, необходимую для однозначного определения реакции H на интервале (t_0, t_k) на произвольный входной сигнал $G(t_0, t_k)$.

В свою очередь, сами переменные состояния $Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_n(t)$ в любой момент времени $t \in (t_0, t_k)$ являются однозначными функциями начального состояния $Z(t_0)$ и реализации входа $G(t_0, t_k)$, т. е.

$$H_i(t) = \Phi_0[Z_1(t_0), Z_2(t_0), \dots, Z_n(t_0); G_1(t_0, t_k), G_2(t_0, t_k), \dots, G_q(t_0, t_k); t],$$

или в векторной форме:

$$H(t) = f[Z(t_0), G(t_0, t_k), t]. \quad (7.46)$$

Для СУ, динамические свойства которой описываются линейными дифференциальными уравнениями, уравнения ее состояния можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} Z(t) &= A Z(t) + B G(t), \\ H(t) &= C Z(t) + U G(t), \end{aligned} \right\} \quad (7.47)$$

где A — матрица коэффициентов; B — матрица управления; C — матрица выхода; U — матрица обхода системы.

Элементы матриц коэффициентов, управления, выхода и обхода объекта являются постоянными в случае стационарной системы. Для нестационарной СУ все или некоторые из элементов матриц, входящих в уравнения состояния, зависят от времени t . Эти уравнения называют уравнениями состояния.

Векторы H , G и Z называют соответственно вектор выхода, входа и состояния объекта. Считается, что вектор H принимает соответствующие значения в пространстве состояния СУ с параметрами Z .

Понятие переменных состояния используют и для описания входных сигналов. Для этого записывают дифференциальное векторное уравнение

$$V' = PV, \quad V = [V_1, V_2, \dots, V_m]^T, \quad (7.48)$$

решение которого $V(t)$, $t \in (0, t)$, полученное при определенных начальных условиях $V(0)$, однозначно определяет входной вектор

$$u(t) = DV(t), \quad t \in (0, t), \quad (7.49)$$

где D — матрица размером $g \times m$.

Тогда поведение СУ, на которую действует входной сигнал $u(t)$, представляется однородным векторным дифференциальным уравнением

$$\dot{z}(t) = f[z(t); t], \quad z(0) = z_0, \quad (7.50)$$

где $z(t) = [V(t), x(t)]^T$ — вектор состояния системы; $z(0)$ — начальное состояние.

Считается, что вектор z принимает значение в расширенном пространстве состояний СУ $z = xv$, где $v \in V$ — пространство состояний входа СУ.

Для СУ с линейными параметрами уравнения состояния имеют вид

$$\dot{z}(t) = Fz(t); \quad u(t) = Nz(t). \quad (7.51)$$

Здесь F, N — расширенные матрицы соответственно коэффициентов СУ и ее выхода.

Существует ряд способов формирования уравнений состояния (прямое, последовательное и параллельное программирования) в форме (7.51). При нахождении этих уравнений удобно использовать схемы в переменных состояния.

Для представления динамических свойств линейных стационарных систем с одним входом $u(t)$ и одним выходом $y(t)$ часто используют передаточную функцию

$$W(S) = \frac{y(P)}{u(P)} = \frac{b_m P^m + b_{m-1} P^{m-1} + \dots + b_1 P + b_0}{P^n + a_{n-1} P^{n-1} + \dots + a_1 P + a_0}. \quad (7.52)$$

Ее легко определить, если задано дифференциальное уравнение системы в виде

$$\begin{aligned} \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t). \end{aligned} \quad (7.53)$$

Следует отметить, что динамические связи в уравнениях (7.48) или (7.49) для объекта, имеющего вход $G(t)$ и выход $H(t)$, задаются единственным образом. Однако уравнения состояния (7.47) или (7.51) для одного и того же объекта не единственны и могут иметь различные матрицы A , B , C , H или F . Элементы этих матриц зависят от способа перехода от уравнения (7.52) или (7.53) к схеме в переменных состояния.

Процесс составления схем в переменных состояния часто называют программированием. Такое название оправдано тем, что используемые приемы совершенно аналогичны как для непрерывных, так и для импульсных систем. Схемы в переменных состояния импульсных систем применяют для составления программ при моделировании на ЭВМ. Схемы в переменных состояния для непрерывных систем могут служить непосредственно для составления схемы набора при моделировании на аналоговых вычислительных машинах (АВМ).

При *прямом программировании* передаточная функция ТО (7.52) записывается (после деления числителя и знаменателя на P^n) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{H(P)}{b_m P^{-(n-m)} + b_{m-1} P^{-(n-m+1)} + \dots + b_1 P^{-(n-1)} + b_0 P^{-n}} = \\ = \frac{G(P)}{1 + a_{n-1} P^{-1} + \dots + a_1 P^{-(n-1)} + a_0 P^{-n}}. \end{aligned} \quad (7.54)$$

Приравнивая правую и левую части к $E(P)$, получаем

$$\begin{aligned} E(P) = G(P) - a_{n-1} P^{-1} E(P) - \dots - a_1 P^{-(n-1)} E(P) + a_0 P^{-n} E(P), \\ H(P) = b_m P^{-(n-m)} E(P) + b_{m-1} P^{-(n-m+1)} E(P) + \dots \\ \dots + b_1 P^{-(n-1)} E(P) + b_0 P^{-n} E(P). \end{aligned} \quad (7.55)$$

Эти уравнения применяют для составления схемы в переменных состояния. На рис. 7.16, а показана структурная схема для $n = 3$, $m = 2$.

Переменными состояниями являются выходы интеграторов (Z_1, Z_2, Z_3). Если предположить, что $U(t)$ является ступенчатой функцией $1(t)$, то дифференциальными уравнениями для переменных состояния, показанных на рис. 7.16, а, являются

$$G' = 0, Z_1' = Z_2, Z_2' = Z_3, Z_3' = G - a_2 Z_3 - a_1 Z_2 - a_0 Z_1,$$

или в соответствии с (7.51)

$$Z' = \begin{bmatrix} G' \\ Z_1' \\ Z_2' \\ Z_3' \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} G \\ Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix}.$$

Уравнение выхода имеет вид

$$H(t) = b_0 Z_1 + b_1 Z_2 + b_2 Z_3,$$

При параллельном программировании передаточная функция представляется в виде суммы простейших дробей

$$W(P) = \sum_{i=1}^k W_i(P). \quad (7.56)$$

Если все корни R_i ($i=1, 2, \dots, n$) характеристического уравнения

$$R^n + a_{n-1}R^{n-1} + \dots + a_1R + a_0 = 0$$

действительны и различные, т. е.

$$W(P) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{R - R_i},$$

то коэффициенты A_i находят методом неопределенных коэффициентов. Схема для объекта $W(P)$ получается параллельным соединением элементов. Для $m=2, n=3$ и различных действительных корней характеристического уравнения на рис. 7.16, б показана структурная схема, ММ в переменных состояния. При скачкообразном входном сигнале уравнения состояния в этом случае имеют вид

$$\begin{aligned} G' &= 0; Z_1' = a_1 G - R_1 Z_1; Z_2' = a_2 G - R_2 Z_2, \\ Z_3' &= a_3 G - R_3 Z_3; H = Z_1 + Z_2 + Z_3 \end{aligned}$$

или

$$H = \begin{bmatrix} G' \\ H'_1 \\ H'_2 \\ H'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_1 & -R_1 & 0 & 0 \\ A_2 & 0 & -R_2 & 0 \\ A_3 & 0 & 0 & -R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix}. \quad (7.57)$$

Форму представления схем и уравнений состояния при параллельном программировании называют канонической.

В общем случае, когда характеристическое уравнение содержит комплексные корни, отдельные ветви схемы в переменных состояния (для слагаемых

$W_i(P) = \frac{D_i R + E_i}{P^2 + R_i P + q_i}$) строятся так же, как и при прямом программировании. При наличии кратных корней отдельные ветви (для слагаемых

вида $W_i(P) = \frac{A_i}{(P - R_i)^r}$ или $W_i(P) = \frac{D_i P + E_i}{(P^2 + R_i P + q_i)^r}$, $r > 1$) строятся последовательным программированием.

При последовательном программировании передаточная функция (7.54) представляется в виде произведения простейших дробей

$$W(P) = \prod_{i=1}^K W_i(P). \quad (7.58)$$

Схема СУ (рис. 7.16, в) получается последовательным соединением схем в переменных состояния, полученных для каждой передаточной функции $W_i(P)$, ($i=1, 2, \dots, k$):

$$\begin{aligned} W(P) &= \frac{H(P)}{G(P)} = \frac{b(P-L_1)(P-L_2)}{P(P-R_1)(P-R_2)} = \frac{b}{P} \frac{P-L_1}{P-R_1} \frac{P-L_2}{P-R_2} = \\ &= \frac{b}{P} \left(1 + \frac{R_1-L_1}{P-R_1}\right) \left(1 + \frac{P_2-L_2}{P-R_2}\right). \end{aligned}$$

При постоянном входном сигнале уравнения состояния имеют вид

$$\begin{aligned} G' &= 0, \\ Z'_1 &= -R_2 Z_1 + (R_2 - L_2) Z_2 + (R_3 - L_3) Z_3; \\ Z'_2 &= -R_1 Z_2 + (R_1 - L_1) Z_3; \\ Z'_3 &= bG; \\ H &= Z_1 + Z_2 + Z_3 \end{aligned}$$

или

$$H' = \begin{bmatrix} G' \\ Z'_1 \\ Z'_2 \\ Z'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_2 & R_2 - L_2 & R_3 - L_3 \\ 0 & 0 & -R_1 & R_1 - L_1 \\ b & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} \quad (7.59)$$

$$H = [0 \ 1 \ 1 \ 1] H.$$

Нетрудно заметить, что уравнения состояния будут другими при иной последовательности соединения элементов $W_i(P)$, например, если

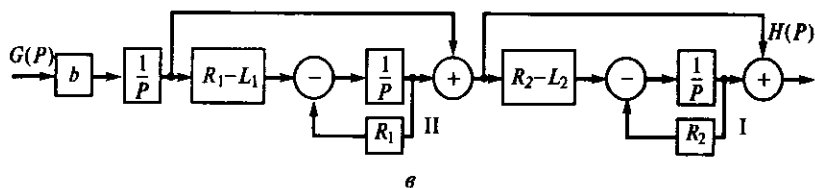
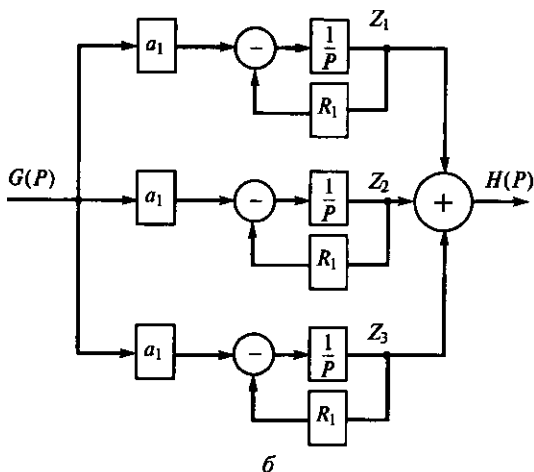
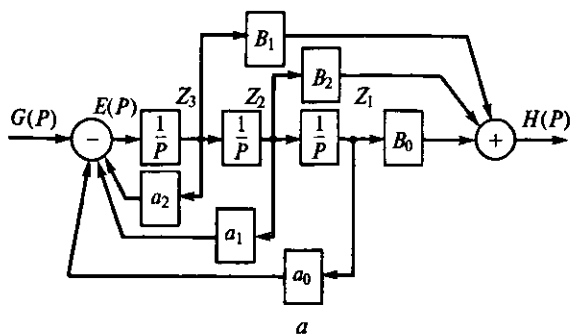


Рис. 7.16. Структурные схемы ММ:

а — прямого программирования; б — параллельного программирования;
в — последовательного программирования

элемент $\frac{b}{P}$ поставить не на входе, а на выходе объекта. Этот факт лишний раз подтверждает возможность широких вариаций математических моделей ТО с целью выбора удобных для исследований зависимостей между переменными состояния.

При моделировании динамических процессов с помощью ЭВМ следует матрицы (7.57), (7.59) представить в виде матрицы перехода

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} a_{11}(t) & a_{12}(t) & \cdots & a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) & \cdots & a_{2n}(t) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1}(t) & a_{m2}(t) & \cdots & a_{mn}(t) \end{bmatrix}, \quad (7.60)$$

где $a_{ij}(t)$ — выражение для реакции на единичный скачок в точке i , при возбуждении схемы в точке j .

В качестве примера рассмотрим контурную фрезерную обработку на станке с ЧПУ (которая имеет общие черты с обработкой сложного профиля на токарном станке с ЧПУ). Формообразование контура происходит за счет согласованного во времени относительного движения заготовки и инструмента по взаимоперпендикулярным направлениям.

Управление перемещениями при обработке контура осуществляется СЧПУ (рис. 7.17). Характерными случаями являются: обработка элемента контура в виде дуги окружности (рис. 7.17, а), обработка элемента контура в виде прямой (рис. 7.17, б), а также варианты обработки элементов в виде изломов траектории (рис. 7.17, в и г). Достижение соответствия полученного в результате обработки контура, заданному по программе, является основной технологической задачей.

При обработке контура, имеющего произвольную геометрию, динамические ошибки системы существенно зависят от геометрии каждого участка контура, его положения в осях координат станка, а также от величины контурной скорости. Последнее обстоятельство используют при обеспечении точности контурной обработки. Снижая величину контурной скорости, уменьшают величину динамической ошибки и таким образом уменьшают отклонения размеров на контуре. Как правило, занижают величину контурной скорости вдоль всего контура. При этом неоправданно снижается производительность обработки.

Прогнозирование точности контурной обработки на стадии проектирования ТП обработки позволяет определить участки контура, на которых необходимо принять меры к снижению отклонений размеров. При этом, варьируя различными методами снижения отклонений размеров, по имеющейся информации о процессе формообразования контура повышают производительность обработки при обеспечении требуемой точности.

При разработке ММ с использованием метода пространства состояний следует иметь в виду, что при описании процессов контурной обработки достаточный порядок дифференциального уравнения (7.53) из условия точности ММ составляет $n = 3$. Использование методов параллельного и последовательного программирования позволяет получить матрицы (7.60) с некоторыми нулевыми компонентами (разряженные матрицы), что упрощает расчет на ЭВМ. Однако метод последовательного

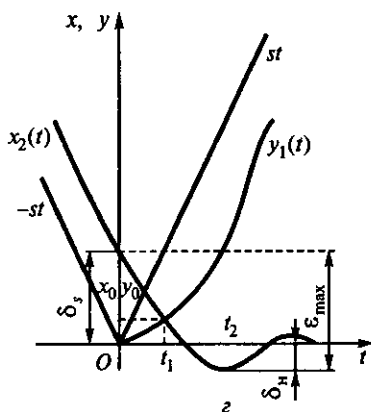
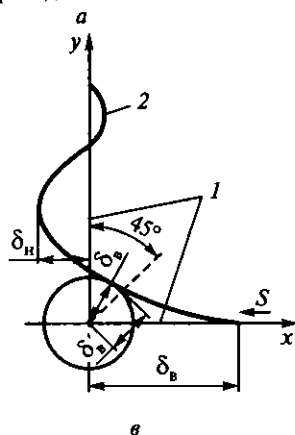
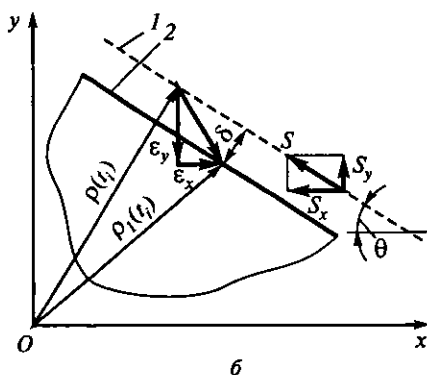
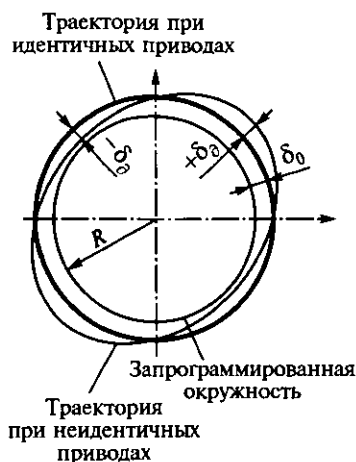


Рис. 7.17. Обработка контуров в виде окружности (а), отрезка прямой (б), углов — прямого (в) и произвольного по величине (г)

программирования предполагает построение СУ с апериодическим законом изменения выходного параметра, что при обработке контура не используется. Использование колебательного процесса предполагает использование метода параллельного программирования.

Математическую модель процесса формирования контура путем относительного движения заготовки и инструмента в процессе формообразования контура по каждой из координат можно представить в виде дифференциального уравнения

$$T_1 T_2 \frac{d^3 H}{dt^3} + (T_1 + T_2) \frac{d^2 H}{dt^2} + K(T_3 + 1) \frac{dH}{dt} + KH = K(T_3 + \eta) \frac{dG}{dt} + KG, \quad (7.63)$$

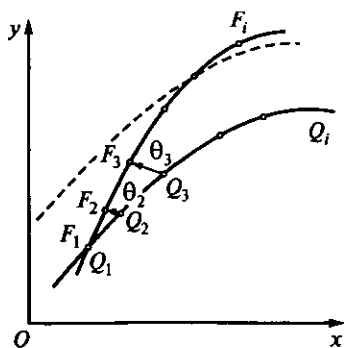


Рис. 7.18. Общий случай обработки контура произвольной геометрии

где η — коэффициент введения производной по управляющему воздействию; T_1, T_2, T_3 — постоянные времени динамической системы; K — коэффициент усиления динамической системы.

Параметр η определяет информацию о скорости перемещения по отдельной координате и не определяет информацию о величине перемещения.

Анализ точности получаемого контура целесообразно производить рассматривая погрешность, как отклонение размеров в каждой точке заданного контура (рис. 7.18). Располагая методикой расчета положения точек полученного контура,

легко в автоматическом режиме проводить анализ протекания процесса формообразования контура.

Для определения положения точек полученного в результате обработки контура необходимо решение дифференциального уравнения (7.63) для каждой из координат. Здесь нужно иметь в виду, что решение его традиционными методами наталкивается на серьезные трудности. Во-первых, решение необходимо проводить для каждой точки контура с шагом, равным дискрете системы управления обеспечивающей управление процессом формообразования. Во-вторых, решать указанные дифференциальные уравнения необходимо при ненулевых начальных условиях. С учетом того, что уравнение окружности описывается дифференциальным уравнением второй степени, в целом указанные уравнения могут иметь пятый порядок.

Решение поставленной задачи оказывается практически невозможной даже при использовании больших ЭВМ. Обычно при разработке ТП используют вычислительные устройства малой мощности. В свете этого желательно иметь методику, позволяющую решать поставленную задачу средствами малой вычислительной техники.

Используя преобразования Лапласа к уравнению (7.53), можно получить передаточную функцию, характеризующую динамические характеристики системы по каждой из координат. В общем виде функция имеет вид

$$\Phi(P) = \frac{(T_3 + \eta)KP + K}{T_1 T_2 P^3 + (T_1 + T_2)P^2 + K(T_3 + 1)P + K}. \quad (7.64)$$

Для каждой из координат структура функции сохраняется. Различия состоят лишь в значениях коэффициентов, составляющих функцию.

Рассматривая выходной параметр H , как значение координаты в общем виде, для него можно записать следующие выражения:

для случая обработки элемента контура в виде отрезка прямой

$$H = \frac{S}{P} \frac{KP(T_3 + \eta) + K}{T_1 T_2 P^3 + (T_1 + T_2)P^2 + K(T_3 + 1)P + K}; \quad (7.65)$$

для случая обработки элемента контура в виде дуги окружности

$$H = \frac{\omega P}{P^2 + \omega^2} \frac{KP(T_3 + \eta) + K}{T_1 T_2 P^3 + (T_1 + T_2)P^2 + K(T_3 + 1)P + K}. \quad (7.66)$$

Представим вторую дробь правой части выражения (7.65) и (7.66) в виде простейших дробей, для чего найдем значения коэффициентов выражения, стоящего в знаменателе этих уравнений. Для этого необходимо привести это выражение к «неполному» виду:

$$T^2 P^3 + 2\xi T P^2 + P + K = 0. \quad (7.67)$$

Разделив почленно члены уравнения на T^2 , получим

$$P^3 + \frac{2\xi}{T} P^2 + P + \frac{K}{T^2} = 0.$$

Таким образом, уравнение приведено к виду

$$Y^3 + SY + q = 0, \quad (7.68)$$

где $S = -a^2/3 + b$; $q = 2(a/3)^3 - ab/3 + c$; $a = \frac{2\xi}{T}$; $b = 1$; $c = \frac{K}{T^2}$.

Корни «неполного» кубического уравнения соответственно равны

$$Y_1 = A + B$$

и

$$Y_{2,3} = -\frac{A+B}{2} \pm i \frac{A-B}{2} \sqrt{3}.$$

Здесь $A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}$; $B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}$, $Q = \left(\frac{S}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2$.

При разложении выражения (7.64) на простые дроби получают произведение двух дробей.

Формирование ММ, описывающей поведение рабочего органа станка по каждой из координат, можно получить одним из трех методов: прямого, последовательного или параллельного программирования.

Применим метод параллельного программирования. Преобразуем выражение (7.64), используя метод неопределенных коэффициентов

$$\Phi(P) = \frac{E_1}{P - P_1} + \frac{E_2 P + E_3}{(P - M)^2 + L^2}, \quad (7.69)$$

где

$$E_1 = -E_2 = \frac{K + \eta P_1}{M^2 + L^2 - 2MP_1 + P_1^2};$$

$$E_3 = \frac{\eta (M^2 + L^2) - KP_1 + 2MK}{N - 2MP_1 + P_1^2}.$$

Для разработки ММ процесса формообразования необходима структурная схема динамических процессов, протекающих по каждой из координат. На рис. 7.19 представлена структурная схема ММ для каждой координаты, построенная на основе выражения (7.64) методом параллельного программирования.

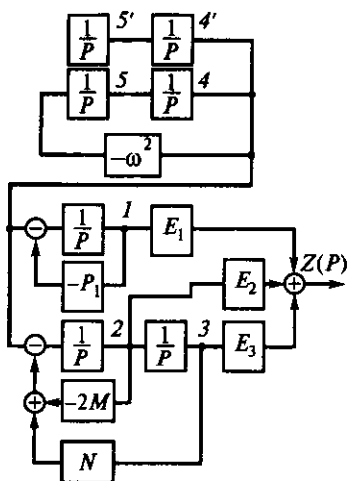


Рис. 7.19. Структурная схема ММ контурной обработки (для каждой координаты)

Используя построенную структурную схему, опишем связи между выходами интегрирующих звеньев динамической системы. Для этого используем передаточные функции, связывающие выходы интегрирующих звеньев. Отдельным передаточным функциям присвоим двухзначные индексы. Первая цифра означает номер точки, где происходит наблюдение реакции системы на ее возбуждение, вторая означает номер точки возбуждения системы единичным скачком.

Например, функция, описывающая взаимосвязь между точками 3 и 2, имеет вид

$$W_{32}(P) = \frac{-NP + 2MN}{P^2 - 2MP + N}. \quad (7.70)$$

Аналогично описываются передаточные функции для связей между другими точками динамической системы. Для описания функций $a_{mn}(t)$, определяющих вид переходных процессов, протекающих в каждой точке системы под действием возбуждения этой системы в различных ее точках, имеем в виду, что возбуждение осуществляется единичными скачками вида

$$G(P) = \frac{1}{P}. \quad (7.71)$$

Применяя обратные преобразования Лапласа для функций $W_{mn}(P)$ и $G(P)$, можно получить законы изменения выходных величин $a_{mn}(P)$ во всех точках динамической системы. Например, для точек 3 и 2 выражение для функции $a_{32}(t)$ имеет вид

$$a_{32}(t) = L^{-1} \left[\frac{-NP + 2MN}{P(P^2 - 2MP + N)} \right] = 2M \frac{N}{L} e^{Mt} \sin(Lt - 2 \arctg \frac{L}{M}). \quad (7.72)$$

Подставив в полученные выражения значение времени, в течение которого при заданной контурной скорости совершается взаимное перемещение инструмента и заготовки на одну дискрету системы управления, получим числовые значения коэффициентов $a_{mn}(P)$. Эти коэффициенты характеризуют изменение состояния динамической системы во всех ее точках за указанный период времени. Запишем полученные коэффициенты в виде матрицы

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{51} & a_{52} & \dots & a_{55} \end{bmatrix}. \quad (7.73)$$

При моделировании протекающих в динамической системе реальных процессов, связанных с контурной обработкой, возбуждение необходимо осуществлять скачками возбуждающих воздействий, обычно отличающихся от единичного на некоторую величину. Значения скачков возбуждающих воздействий можно представить в виде произведения единичного скачка и некоторой функции $Z_m(t)$.

Для определения значения функции $Z(t)$ для m -й точки динамической системы можно воспользоваться выражением

$$Z_m(t) = \sum_{j=1}^n Z_j(t - \Delta t) a_{mj}. \quad (7.74)$$

Таким образом, выражение для матрицы состояния выхода динамической системы может быть определено через матрицы коэффициентов и состояния выхода динамической системы

$$\begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \\ \dots \\ Z_5(t) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} Z_1(t - \Delta t) \\ Z_2(t - \Delta t) \\ \dots \\ Z_5(t - \Delta t) \end{bmatrix}. \quad (7.75)$$

Информацию о состоянии динамической системы можно получить с шагом, равным Δt . Поэтому точность расчетов будет тем выше, чем меньше величина Δt . С другой стороны, при расчете процесса формообразования контура с уменьшением величины Δt растет число шагов и, следовательно, происходит увеличение объема вычислений. Исследования показывают, что оптимальным является выбор значения Δt , равного величине дискреты системы управления, деленной на величину контурной скорости.

Таким образом, состояние динамической системы в каждый момент времени можно свести к осуществлению элементарных арифметических действий над известными численными значениями коэффициентов матриц, описывающих свойства динамической системы. Это принципиально упрощает расчеты, связанные с определением положения контура, получаемого в результате протекания процесса формообразования. Полученная структурная модель динамических процессов позволяет осуществлять моделирование процессов при необходимости на аналоговых вычислительных машинах.

Окончательно уравнение выхода для одной координаты имеет вид

$$H(t) = Z_1(t)E_1 + Z_2(t)E_2 + Z_3(t)E_3. \quad (7.76)$$

Здесь $H(t)$ — значение координаты в текущий момент времени.

При расчетах по приведенной методике на первом этапе рассчитывается матрица коэффициентов динамической системы. Далее, давая приращения параметра t с шагом Δt , определяются координаты точек F , составляющих получаемый в результате процесса формообразования контур (см. рис. 7.18) и координаты точек Q контура, заданного по программе. Последовательно осуществляя расчет вдоль по каждому из этих контуров, можно легко определить наикратчайшие расстояния от точек контура, заданного по программе, до точек контура, полученного в результате протекания процесса формообразования.

Если точки полученного контура отстают от точек заданного по программе в пределах величины допуска, то на этих участках условие обеспечения точности выполняется. В тех точках, где полученный контур выходит за установленные пределы, требуется принять специальные меры по изменению траектории получаемого контура.

В связи с тем что отклонения размеров существенно зависят от расположения контура в осях координат станка, необходимо при проектировании ТП контурной обработки определять оптимальное положение заготовки на столе станка. Для этого необходимо, используя разработанную методику, определить отклонения размеров во всех точках заданного по программе контура и просуммировать их. Физическим смыслом полученной величины является площадь фигуры, образованной отклонениями

размеров. При варьировании угла поворота заготовки в осях координат станка площадь будет меняться. Оптимальным положением заготовки на столе станка будет считаться такое, при котором площадь указанной фигуры минимальна.

При расчетах отклонений размеров Q на контуре можно использовать формулу

$$Q = \sqrt{(F_x - Q_x)^2 + (F_y - Q_y)^2}, \quad (7.77)$$

где Q_x, Q_y — координаты некоторой точки контура, заданного по программе; F_x, F_y — координаты ближайшей к этой точке точки полученного контура.

Суммарная погрешность на контуре

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (7.78)$$

Здесь Q_i — отклонение размера от заданного в i -й точке контура.

Условие оптимального положения заготовки на столе станка

$$Q_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (7.79)$$

Определение оптимального положения заготовки на столе станка позволяет сократить протяженность участков контура, на которых величина отклонений размеров превышает заданную величину. Используя предлагаемую методику расчета отклонений размеров для сокращения их величин, можно использовать метод управления по скорости. В этом случае изменение контурной скорости оказывается минимальным, что приводит к повышению производительности обработки по сравнению с традиционными методами обеспечения точности.

7.7. Оптимальное управление технологическими объектами

При разработке автоматических СУ ТО прежде всего ставится задача — система должна выполнять функциональное назначение, определяемое целью управления. Иногда ставят более сложную задачу — разработать СУ с наилучшими показателями качества. Для их разработки применяют принцип оптимальности, позволяющий обеспечить наилучшее выполнение цели управления.

Автоматическую систему управления, обеспечивающую наилучшие технические или технико-экономические показатели качества при заданных условиях работы и ограничениях, называют оптимальной. Оценку достижимости цели в процессе управления ТО, представленную в формализованном виде (аналитической форме), принято называть критерием

оптимальности, или целевой функцией. Разработка наилучшей СУ, удовлетворяющей поставленным требованиям, представляет собой задачу синтеза оптимальной системы.

Возможны два основных типа задач синтеза оптимальных СУ ТО. В задачах первого типа известна структура СУ ТО (передаточные функции регулятора $K_p(p)$ и ТО $K_o(p)$), требуется найти оптимальное значение ее числовых параметров, при которых обеспечивается экстремальное значение заданного показателя качества (синтез параметров СУ ТО). В задачах второго типа СУ полностью неизвестна и требуется определить ее структуру и параметры так, чтобы она была оптимальной по принятому показателю качества (синтез структуры СУ). На практике обычно задан объект управления, поэтому задача синтеза состоит в определении структуры и параметров оптимального управляющего устройства — УУ (рис. 7.20).

Переменные выхода $Y(t)$, управления $u(t)$, входных $x_{вх}(t)$ и возмущающих $f_v(t)$ воздействий в общем случае могут быть как скалярными, так и векторными величинами при многомерных объектах: $Y(t), u(t), X_{вх}(t), f_v(t)$.

Наиболее распространенной является задача определения оптимальных управлений $u(t)$, обеспечивающих оптимальные процессы в функции времени при заданных начальных $Y(t_0)$ и конечных $Y(t_k)$ значениях выходных переменных. Оптимальные управления $u(t)$ ТО и их реализацию различают для двух основных случаев — без применения обратных связей (разомкнутая СУ) и с применением обратных связей (замкнутая СУ). В разомкнутой оптимальной СУ управляющее устройство по заданным граничным условиям формирует оптимальный закон управления. При этом координаты ТО не используются в формировании закона управления. В замкнутой оптимальной СУ на вход УУ подаются соответствующие сигналы с выхода ТО (рис. 7.21).

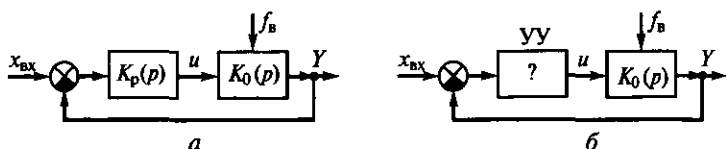


Рис. 7.20. Структурная схема систем управления:
а — с известной структурой; б — с неизвестной структурой

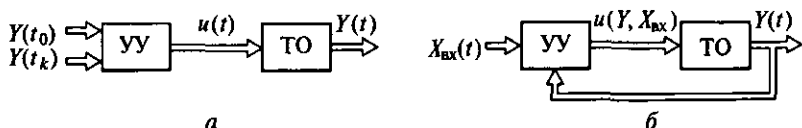


Рис. 7.21. Структурная схема систем оптимального управления:
а — разомкнутой; б — замкнутой

Решение задачи синтеза оптимальной системы управления начинают с описания реальных элементов системы математическими соотношениями (составления ММ системы). Далее устанавливают имеющиеся ограничения для координат системы и анализируют характеристики сигналов внешних воздействий, а также составляют математическое выражение заданного критерия качества. После того как задача синтеза математически сформулирована, ее решают соответствующими математическими методами, в результате чего находят функцию управления из условия минимума или максимума показателя качества, определяющего оптимальный режим работы ТО.

Аналитическое решение задачи синтеза оптимальных систем управления выполняют методами теории оптимального управления, в результате которого находят аналитическое выражение, определяющее структуру и параметры УУ.

В простых задачах управления стационарными объектами при отсутствии внешних возмущений можно ограничиться таким алгоритмом оптимального управления, который определяет неизменную настройку оптимального регулятора (управляющего устройства). При этом предусматривается наличие достаточного объема предварительных сведений (априорной информации) о внутренних и внешних условиях работы объекта и системы. Чем полнее на стадии проектирования априорная информация о характеристиках системы и условиях ее работы, тем точнее СУ, полученная в результате проектирования. Это означает, что в данном случае оптимизируется только конструкция системы с целью получения оптимальных процессов.

Существует большой класс объектов управления, статические и динамические характеристики которых изменяются в широких пределах заранее непредвиденным образом; при этом невозможно описать физические процессы, протекающие в них при функционировании СУ в реальных условиях. В связи с этим СУ нестационарными объектами будут работать в условиях неопределенности (недостаточности — «неполноты» — априорной информации о характеристиках управляемого процесса).

Дальнейшее совершенствование производственных и ТП обусловлено усложнением задач управления. Специфическая особенность этих усложнений заключается в практической невозможности подробного изучения и описания процессов, протекающих в СУ. По мере усложнения задач, возлагаемых на СУ из-за уменьшения априорной информации о системе, появляются трудности в обеспечении заданного качества управления. Для преодоления этих трудностей при разработке СУ, функционирование которых происходит в условиях неопределенности, применяют принцип адаптации. Это позволяет искусственно создать эффект приспособления к изменяющимся условиям в СУ за счет того, что часть функций

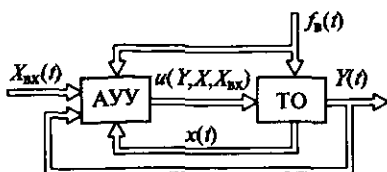


Рис. 7.22. Обобщенная функциональная схема адаптивной СУ

по получению, обработке и анализу недостающей информации об управляемом процессе осуществляется самой системой в процессе ее нормальной эксплуатации с помощью адаптивного управляющего устройства (АУУ), а не проектировщиком на предварительной стадии разработки системы. Это позволяет существенно снизить влияние неопределенности на качество управления и скомпенсировать в определенной степени недостаток априорной информации об управляемом процессе на стадии проектирования.

Системы управления, в которых параметры управляющих воздействий или алгоритмы управления автоматически и целенаправленно изменяются для осуществления в каком-либо смысле наилучшего управления ТО (причем характеристики ТО или воздействий внешней среды могут изменяться заранее непредвиденным образом), называют адаптивными СУ.

Развитие новых технических средств радиоэлектроники, вычислительной техники и технической кибернетики, а также изучение и моделирование органов живых организмов позволяют создавать и совершенствовать адаптивные СУ.

Обобщенная функциональная схема адаптивной СУ показана на рис. 7.22, где АУУ в общем случае представляет собой комплекс измерительных, преобразовательных и вычислительных устройств, а также усиленных и исполнительных элементов.

Принцип адаптации применяют в тех случаях, когда сложность управляемого процесса (нестационарного объекта) достигает такого уровня, при котором влияние неполноты априорной информации об условиях работы системы становится существенным и невозможно обеспечить заданное качество процессов управления без приспособления системы к изменяющимся непредвиденным образом условиям функционирования.

Учитывая, что основным назначением всякой СУ является достижение требуемой цели управления в условиях, в общем случае заранее не определенных, их можно разделить на два класса:

- системы с жесткой настройкой, в которых неполнота информации не мешает достижению цели управления;
- адаптивные СУ, в которых неполнота информации не позволяет достигнуть цели управления с заданной точностью без автоматического приспособления системы в условиях неопределенности.

Оба класса СУ можно построить таким образом, чтобы обеспечивались наилучшие показатели качества, т. е. в общем случае указанные классы систем могут быть оптимальными СУ с «жесткой» настройкой и адаптивными оптимальными СУ. При решении задачи синтеза оптимальной адаптивной СУ выбирают показатель качества, характеризующий достижение требуемой цели управления в условиях неопределенности. Аналитическое решение задачи синтеза адаптивных систем выполняют соответствующими методами теории автоматического управления. Оптимизацию сложных СУ с помощью адаптивных управляющих устройств называют автоматической оптимизацией.

Таким образом, при разработке оптимальных адаптивных СУ ТО создают их оптимальную конструкцию, которая обеспечивает автоматическую оптимизацию в условиях неопределенности.

7.8. Развитие систем управления технологическими объектами

Развитие средств автоматики и электроники и прежде всего механизмов и устройств программного управления позволяет выполнять эти функции на качественно более высоком уровне, а именно — управлять работой агрегатов с оптимизацией режимов их работы, адаптацией и самонастройкой режимов, придавая системам управления не только функции исполнения разработанной программы, но в значительной степени и сам процесс программирования.

При создании автоматических и автоматизированных систем различного назначения до недавнего времени в качестве их вычислительной основы широко использовали два класса средств цифровой техники:

- устройства с жесткой структурой, выполненные на базе цифровых логических схем;
- электронные вычислительные машины (ЭВМ) универсальные и управляющие.

Устройства с жесткой структурой обычно содержат большое число дискретных элементов и интегральных схем малой и средней степени интеграции. При этом различного рода изменения функций требуют изменения схемы (т.е. перепайки соединений, замены компонентов), проверочных тестов. Поэтому главным недостатком системы на основе таких устройств являются значительное время проектирования и изготовления, а также трудности внесения изменений.

Системы на основе ЭВМ можно легко перестраивать с реализации одной функции на другую, для чего достаточно составить и занести в память новую программу. Выполнение алгоритма функционирования в таких системах осуществляется программно. При использовании серий-

ных ЭВМ это значительно сокращает сроки проектирования, изготовления и настройки системы.

Использование ЭВМ в процессах управления ТО привело к появлению производственных систем, получивших название CIM (Computer integrated manufacturing) или компьютеризированные интегрированные производства (рис. 7.23). Важнейшими компонентами таких систем являются подсистемы автоматизированного проектирования, а также программно-аппаратный интерфейс. Такая система представляет собой автоматизированный комплекс с гибко перестраиваемой технологией, в которой управление осуществляется от центральной ЭВМ. Эта ЭВМ является системой более высокого уровня управления по отношению к каждой ЭВМ управления ТО, входящих в такой комплекс, и обеспечивает максимальную и равномерную загрузку станков с помощью автоматизированных транспортных средств для деталей и режущих инструментов и осуществляет «наблюдение» за ходом ТП (проведение контроля и ввод соответствующих корректив в работу ТО, изменение соответствующим образом технологических маршрутов обработки и изменение, при необходимости, заданных в программе параметров).

ЭВМ также осуществляет распределение рабочих программ, хранящихся в библиотеке программного обеспечения. При этом, несмотря на то что ЧПУ на базе ЭВМ имеет большой объем собственной памяти, достаточной для хранения программы на осуществление всего ТП, далеко не всегда рационально передавать ее из ЭВМ в ЧПУ полностью из-за трудности корректировки такими средствами.

Следующим более высоким уровнем автоматического управления является обеспечение учета, планирования и диспетчирования работы автоматизированного комплекса. Это по сути дела является уровнем автоматизированной системы управления (АСУ) цеха или предприятия, которая реализуется также с помощью ЭВМ, но, как правило, значительно более мощной, так как обычно здесь решаются более общие задачи, в том числе и задачи автоматизированной подготовки управляющих программ для ТО.

Такая многоуровневая СУ также включает задачи автоматизации административного управления. Данную систему называют гибкой интегрированной системой. При этом более низкие уровни могут в случае необходимости работать автономно.

Системы управления на базе ЭВМ строят также на основе микропроцессоров (МП). В МП объединены универсальные возможности программируемого средства с преимуществами и возможностями, которые представляет технология микропроцессорной техники.

Формирование и развитие МП привело к появлению нового подхода к проектированию цифровых систем на основе программируемой логики.

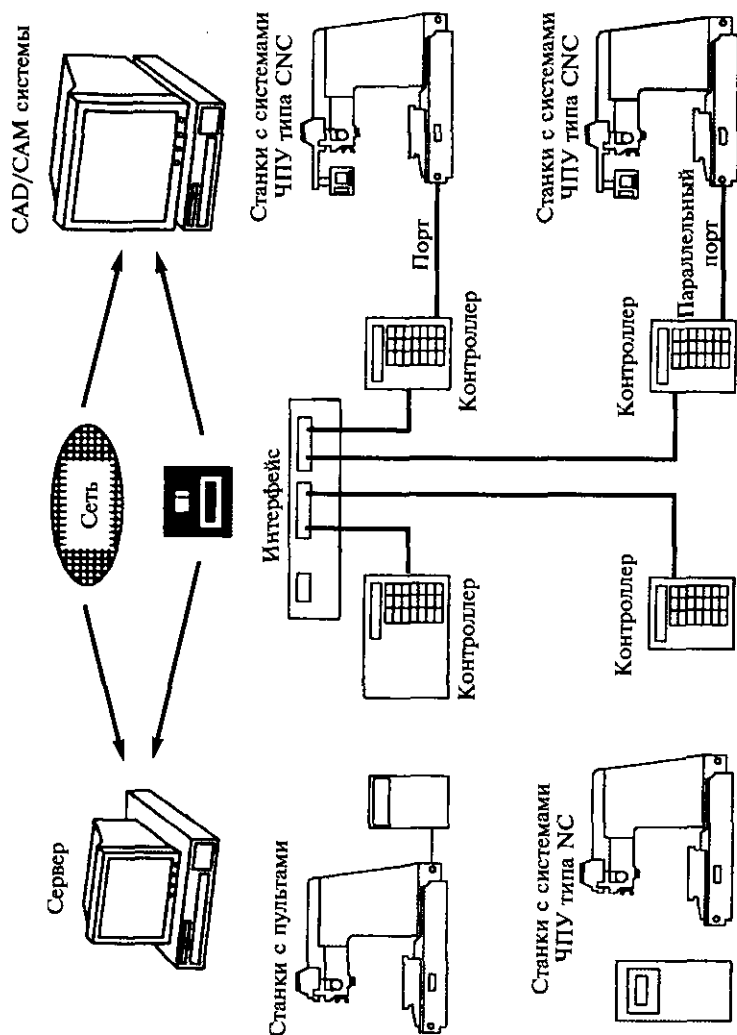


Рис. 7.23. Схема компьютеризированной интегрированной производственной системы

Этот подход предполагает при построении систем использование стандартных универсальных МП, работающих под управлением программы.

Если разработчик систем на основе устройств с жесткой структурой может использовать для реализации необходимых функций только аппаратные средства, а при использовании ЭВМ — в большей степени только

программные средства, то при построении СУ на основе программируемой логики он получает возможность использовать полностью как аппаратные, так и программные средства.

Необходимо отметить, что стоимость, малые размеры и масса, высокая надежность средств МП придают СУ новые качества, позволяющие существенно приблизить средства обработки информации и управления к местам ее возникновения и приложения управляющих воздействий. В конструктивном отношении средства МП становятся встроенными, т.е. являются элементами и узлами автоматических систем, подчиненных своей логике, своим задачам.

Для дальнейшего развития систем управления технологическими объектами и процессами необходимо использовать CALS-технологии. Это обеспечивает предоставление необходимой информации в нужное время, в нужном виде, в конкретном месте жизненного цикла при изготовлении изделия. В этом случае задачами CALS-технологии являются: структурирование и моделирование данных о технологических объектах; обеспечение эффективного управления и обмена данными; создание и сопровождение документации для поддержки жизненного цикла технологического объекта.

Вопросы для самопроверки

1. Что является ТО в машиностроении?
2. Назначение систем управления ТО.
3. Что такое программа управления?
4. Что такое дискрета системы управления?
5. Перечислите основные требования, предъявляемые к СУ.
6. По каким признакам можно классифицировать СУ?
7. Что такое аналоговые СУ?
8. Опишите принцип действия копировальной СУ.
9. Опишите принцип работы гидроусилителя.
10. Чем определяется точность функционирования СУ?
11. Что такое статические и астатические системы управления?
12. Как влияют коэффициенты усиления отдельных звеньев составляющих СУ с обратной связью?
13. Назовите преимущества СУ с обратными связями по сравнению с СУ без обратных связей.
14. Назначение датчиков обратной связи.
15. Какие методы используют при формировании сигналов обратной связи?
16. В каких случаях используют шаговые двигатели и в каких — высокомоментные двигатели?
17. Как формируется сигнал рассогласования в замкнутых СУ?
18. Какое назначение имеет расширенная матрица перехода, каков ее состав?
19. Какой принцип используют при построении оптимальных СУ?
20. Какие перспективы развития имеют СУ в условиях применения интегрированного автоматического управления.

Глава 8

ФОРМИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

8.1. Принцип многообъектного технологического проектирования в распределенных производственных системах

Процесс функционирования РПС характеризуется, в частности, степенью загрузки технологического оборудования ее составляющих. В реальных условиях, при выполнении производственных заданий, неизбежен простой технологического оборудования. Это объясняется следующими факторами: невозможность подбора оборудования по технологическим возможностям, однозначно соответствующим требованиям выполняемых ТП; неритмичностью прохождения плановых производственных заданий; некоторым запасом по количеству и технологическим возможностям технологического оборудования с целью гарантированного обеспечения требуемых условий функционирования ПС и др. Все это приводит к появлению определенного объема избыточности производственных ресурсов. Размер и состав ресурсов, а также характер их изменения во времени являются определяемыми параметрами ПС.

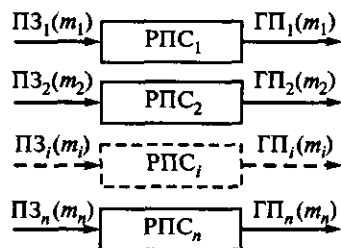


Рис. 8.1. Прохождение ПЗ через РПС

При выполнении каждой РПС своих производственных заданий (ПЗ) производственные процессы в них протекают независимо друг от друга. На рис. 8.1 представлена схема прохождения ПЗ через РПС. В i -й РПС ($1 \leq i \leq n$) выполняется m_i видов готовой продукции (ГП). Для выполнения этого объема РПС_{*i*} должна обладать технологической гибкостью, позволяющей реализовать соответствующие технологические процессы.

Технически возможная гибкость VS_i системы характеризует технически допустимые возможности переналадки системы по отдельным рабочим параметрам (или их совокупности) и представляет собой следующую зависимость:

$$VS_i = \bigcup_{j=1}^{n_{t,oi}} \left(\bigcup_{k=1}^{q_{i,j}} vs_{i,j,k} \right), \quad (8.1)$$

где $n_{t,oi}$ — количество единиц технологического оборудования в i -й ПС; $q_{i,j}$ — множество значений параметров j -й единицы технологического оборудования, достижимые при ее переналадке; $vs_{i,j,k}$ — унитарное значение параметра технологических возможностей единицы оборудования.

Технологически необходимая гибкость VD_i системы характеризуется значениями изменяемых параметров, соответствующих значениям свойств сменяемых деталей:

$$VD_i = \bigcup_{j=1}^{m_i} \left(\bigcup_{k=1}^{h_{i,j}} vs_{i,j,k} \right). \quad (8.2)$$

Здесь $vd_{i,j,k}$ — множество операций, необходимых для выполнения m_i сменяемых деталей; $h_{i,j}$ — количество операций, необходимых для получения j -й готовой детали.

На рис. 8.2 приведены различные варианты распределения технической возможной гибкости и технологически необходимой гибкости. На рис. 8.2, а представлен случай, когда рассматриваемую РПС нельзя использовать для выполнения заданного ТП даже частично. Здесь множество параметров технической возможной гибкости РПС, не имеет общей области с множеством параметров технологически необходимой гибкости, т.е.

$$VS_i \not\subset VD_i. \quad (8.3)$$

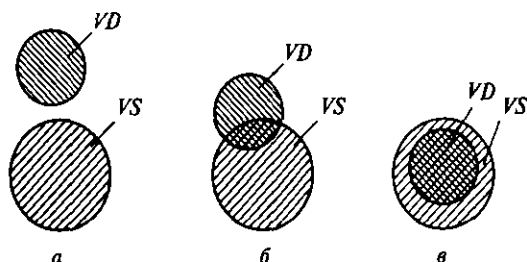


Рис. 8.2. Соотношение технической возможной гибкости и технологически необходимой гибкости:

а — система не может быть использована; б — система может использоваться частично; в — система используется полностью

На рис. 8.2, б представлен случай, когда РПС_i можно использовать для выполнения лишь части заданного ТП. Множество технически возможной гибкости имеет общую область с множеством технологически необходимой гибкости, т. е.

$$VS_i \cap VD_i. \quad (8.4)$$

На рис. 8.2, в представлен случай, когда РПС_i может полностью обеспечить выполнение заданного ТП. Множество технологически необходимой гибкости является подмножеством технически возможной гибкости

$$VS_i \supset VD_i. \quad (8.5)$$

В реальных ПС имеет место третий из приведенных случаев. Таким образом, можно рассматривать каждую производственную систему как некоторый массив параметров, характеризующих ее технологические возможности, причем некоторая часть этого массива в каждый момент времени будет занята выполнением заданных ТП, а другая часть будет оставаться незагруженной. Причем эти части будут меняться как по своему составу, так и по соотношению размеров в каждый момент времени

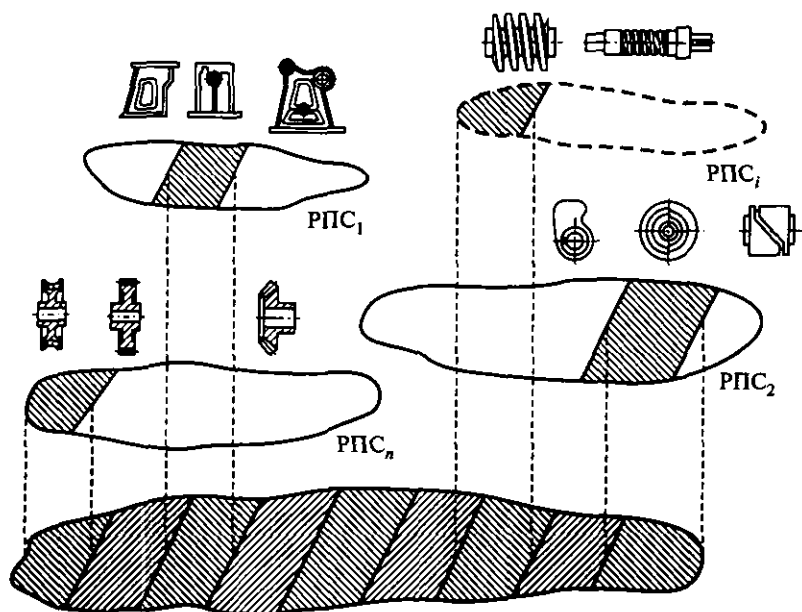


Рис. 8.3. Формирование ОПС на основе множества РПС:

■ — свободная часть РПС

по мере выполнения одних ТП и начала других. При этом в каждый момент времени t можно представить совокупность свободных частей РПС как некоторую виртуальную производственную систему, характерной особенностью которой является то, что она состоит из частей РПС, которые объединены лишь организационно, без проведения каких-либо материальных преобразований.

В каждый период времени технологические возможности каждой РПС в основном связаны с выполнением некоторого объема ПЗ, на которые они ориентированы. При этом некоторая их часть оказывается свободной. Совокупность свободных частей РПС может рассматриваться как обобщенная ПС (ОПС), обладающая технологическими возможностями, превышающими технологические возможности отдельных РПС. Такое объединение является условным и информация об ОПС находится только в памяти ЭВМ. На рис. 8.3 представлен процесс формирования ОПС на основе множества РПС.

Технологические возможности ОПС можно представить в следующем виде:

$$WO = f(\bigcup_{i=1}^n VD_i; K_{vс1}, K_{vс2}, ..., K_{vсi}, ..., K_{vсn}), \quad (8.6)$$

где $K_{vсi}$ — количество одинаковых технологических операций, которые могут быть совмещены ($1 \leq i \leq n$).

Мощность массива технологических возможностей ОПС изменяется во времени. Это вызвано тем, что ПЗ, поступающие в РПС, меняются по номенклатуре и объему партий. При этом соотношение занятых и свободных частей РПС также меняется. На рис. 8.4 показано изменение мощности массива технологических возможностей во времени.

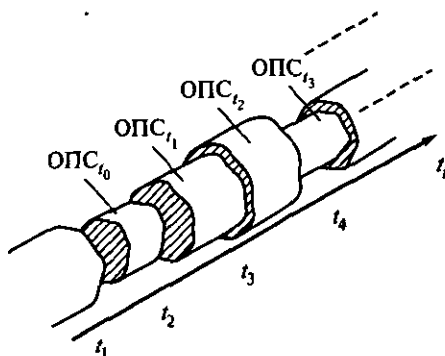


Рис. 8.4. Изменение мощности массива технологических возможностей ОПС

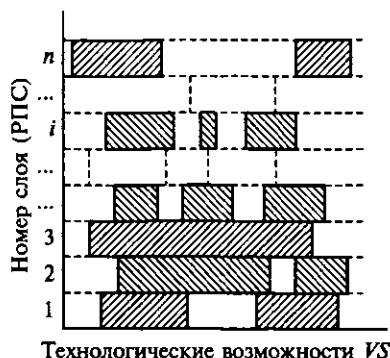


Рис. 8.5. Распределение слоев в ОПС

На отрезках времени $t_i - t_{i+1}$ (i — произвольная величина) мощность массива технологических возможностей является постоянной величиной. В моменты времени t_i происходит окончание очередной технологической операции и (или) начало следующей, и мощность массива меняется скачкообразно.

В связи с определенностью сроков выполнения плановых заданий возможно определение параметров отдельных РПС, составляющих ОПС. Следовательно, с одной стороны, известно распределение технологических возможностей ОПС во времени, с другой — есть некоторый объем ПЗ, который должен быть выполнен. Производственное задание представляет собой задание на изготовление конкретных видов изделий заданного количества.

Однотипные по составу технологического оборудования РПС в параметре WO увеличивают вторую составляющую. Разнотипные РПС — увеличивают первую составляющую. Параметр WO является комплексным параметром, характеризующим технологические возможности ОПС.

Технологические возможности ОПС можно представить в виде слоев (рис. 8.5). Каждый слой характеризует физическую привязку соответствующего множества технологических возможностей к конкретной РПС. Если маршрут обработки предполагает переход из одного слоя в другой, появляются дополнительные затраты, связанные с транспортировкой изделия на этапе его изготовления:

$$Q_1 = \sum q_{\text{внутр}} + \sum q_{\text{внешн}}, \quad (8.7)$$

где $q_{\text{внутр}}$ — затраты на транспортировку изделия в процессе его изготовления в пределах одной РПС; $q_{\text{внешн}}$ — затраты на транспортировку изделия в процессе его изготовления при перемещении из одной РПС в другую.

Целью формирования ПС является выполнение ПЗ в заданные сроки при минимальной себестоимости. С этой целью необходимо оптимизировать объем технологических возможностей, задействованных для его выполнения. При этом суммарные затраты Q_{Σ} на выполнение каждого ПЗ должны быть минимальны:

$$K_1 Q_1 + K_2 Q_2 + K_3 Q_3 = \min Q_{\Sigma}. \quad (8.8)$$

Здесь Q_1 — затраты на транспортировку изделия в процессе его изготовления; Q_2 — затраты на обработку при изготовлении изделия; Q_3 — затраты на штрафы, предусмотренные при нарушении сроков выполнения ПЗ; K_1, K_2, K_3 — коэффициенты значимости затрат.

Для выполнения заданных ПЗ требуется использование части ресурсов ОПС. Следовательно, на основе ОПС необходимо сформировать ПС, наилучшим образом отвечающую требованиям обеспечения выполнения ПЗ. Поскольку информация об организации такой ПС содержится только в памяти ЭВМ, она является ВПС.

При формировании ВПС необходимо выполнение следующих условий:

- 1) минимизировать объем используемых ресурсов, необходимых для выполнения ПЗ;
- 2) максимизировать положительный результат, который можно получить с имеющимся запасом ресурсов;
- 3) получить наилучший баланс затрат (используемых ресурсов) и результатов (выполнения ПЗ).

Время жизни конкретной конфигурации ВПС определяется, с одной стороны, требованиями текущего ТП, с другой — ресурсами ОПС, определяемыми возможностями каждой РПС с точки зрения их собственной загрузки текущими ТП.

Процесс формирования ВПС характеризуется распределением ресурсов ОПС во времени и построением ТП для выполнения ПЗ. Поскольку ПЗ состоит из нескольких видов изделий, процесс проектирования ТП изготовления каждого из них будет определяться результатами проектирования ТП изготовления других видов. Таким образом, процессы проектирования ТП всего ПЗ оказываются взаимосвязанными и зависящими друг от друга, что определяет многообъектность технологического проектирования в условиях ВПС. Процесс технологического проектирования в ВПС определяется следующими параметрами: распределением производственных ресурсов ОПС, характеристиками каждого наименования изделий, количеством изделий каждого наименования, сроками их выполнения.

Формирование очередной конфигурации ВПС определяется взаимодействием двух информационных потоков:

- об изготавливаемых изделиях;
- о параметрах ОПС.

Управление процессами взаимодействия отдельных частей ОПС при формировании ВПС обеспечивает выполнение заданных ПЗ при минимальных экономических затратах. Под управлением будем понимать формирование командной информации на основе принятия решений по комплексной проблеме распределения ресурсов и использования технологий. Особенностью такого управления является во многих случаях предварительное принятие решений, так как достижение желаемого состояния ВПС зависит от набора взаимосвязанных решений (системы решений). Другая особенность заключается в том, что решения, принятые на ранних этапах процесса управления, должны приниматься с учетом их влияния на последующие решения.

Управление связано, с одной стороны, с предотвращением ошибочных действий за счет выявления таковых на ранних этапах, с другой — с уменьшением объема неиспользованных возможностей существующих ПС. Большое количество параметров, влияющих на процесс принятия решения, большой объем вычислений при моделировании поведения ВПС во времени и ограниченность времени требуют построение системы управления на основе интеллектуального управления (ИУ). Интеллектуальное управление позволяет выполнять функции человека при подготовке исходной информации, моделировании, анализе полученной информации и формировании командной информации в условиях ограничения времени во многих случаях без участия самого человека.

8.2. Разработка инвариантной информационной модели виртуальной производственной системы

Технологическое проектирование в условиях РПС является многоэтапным и итерационным. При таком проектировании необходимо формирование информации, включающей в себя массивы данных о предметной области, существующих и разрабатываемых структурах объекта, известных и прогнозируемых отношениях и связях между элементами и свойствами объекта и внешней средой. Такая информация представляет собой порождающую среду, необходимую для принятия решений, на основе которых осуществляется оперативное управление. Составными частями этого управления являются технологическое и организационное управления. Цель технологического управления — обеспечение требуемых свойств изделия, цель организационного управления — формирование ВПС для реализации ТП, необходимых для выполнения ПЗ. Эти управления осуществляют динамическую переконфигурацию ресурсов отдельных доступных частей РПС.

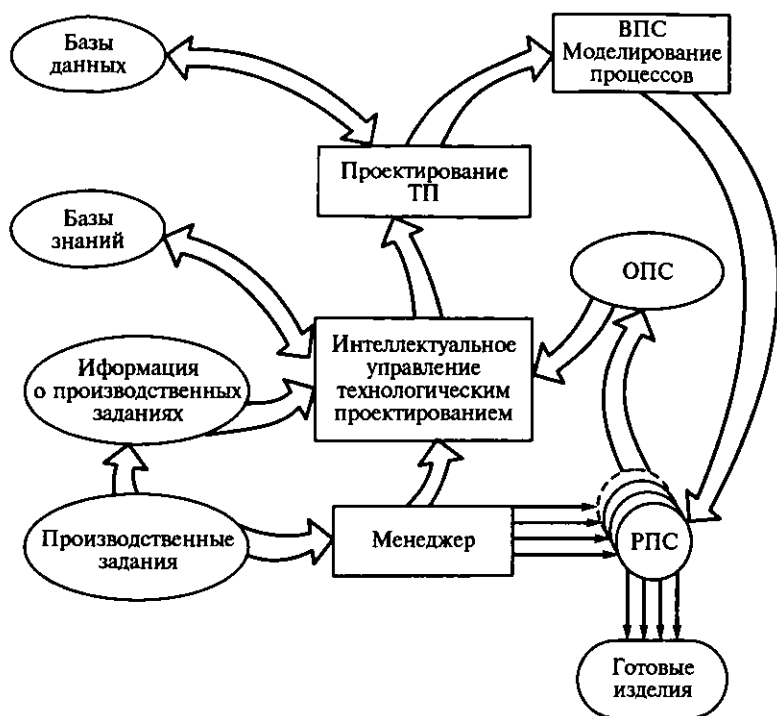


Рис. 8.6. Схема формирования ВПС на основе ОПС

Следует отметить, что решаемая проблема осложняется ограниченностью во времени процессов принятия решения и частым изменением как состава ресурсов доступных производственных систем, так и их параметров.

Для выполнения ПЗ требуется спроектировать технологические процессы и для их реализации сформировать ВПС на основе ОПС. Схема формирования ВПС на основе ОПС представлена на рис. 8.6. Информация о ПЗ поступает в систему технологического проектирования с ИУ. Здесь осуществляется анализ поступающей информации, на основе которого происходит принятие решений по выбору текущей конфигурации ВПС, по определению маршрутов ТП и формируется командная информация для менеджера и РПС, составляющих ВПС.

Анализ и принятие решений осуществляется на основе информации о технологических возможностях ОПС, их распределении во времени, информации о ПЗ в виде спроектированных на них ТП. При этом используются базы данных (БД) и базы знаний (БЗ).

Система управления производством на основе получаемой информации о характеристиках ПЗ и информации об ОПС определяет стратегию

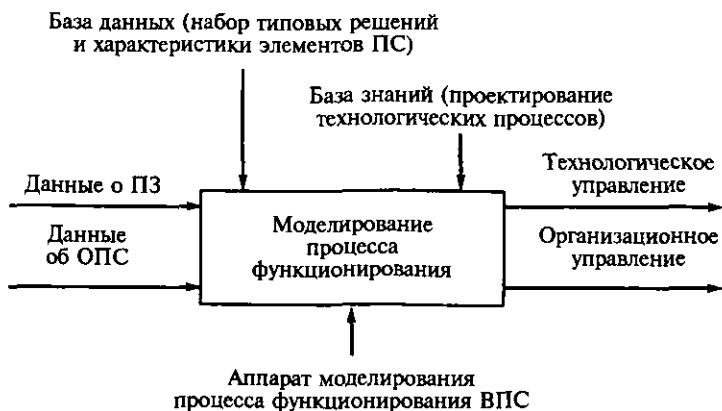


Рис. 8.7. Модель функционирования ВПС

ТП, включающую в себя проектирование ТП, распределение выполняемых технологических операций непосредственно по технологическому оборудованию и последовательность запуска ПЗ. На рис. 8.7 представлена инвариантная информационная модель процесса функционирования ВПС.

Качество функционирования ВПС определяется ее свойствами, основными из которых являются: живучесть, прогнозируемость, устойчивость, управляемость, наблюдаемость.

Для обеспечения надежного функционирования ВПС требуется обеспечение независимости ее функционирования от воздействий внешней среды. Для систем, построенных по иерархической структуре, характерна живучесть — свойство активно противостоять вредным воздействиям внешней среды и выполнять свои функции в условиях такого воздействия. Благодаря этому свойству отказ какой-либо подсистемы приводит не к отказу всей системы, а только к некоторому снижению эффективности ее функционирования.

Использование в ВПС параллельного функционирования родственных элементов или элементов одинакового назначения обеспечивает живучесть системы, т. е. ее функционирование, но с меньшей эффективностью, при выходе из строя одного или нескольких элементов. Работа по такому принципу получила название функционирование с «горячим» резервом. Применительно к ПС в условиях многопоточной обработки выход из строя одного или нескольких единиц технологического оборудования не приводит к остановке всей системы; ее работа продолжается, однако с более низкой производительностью и, как правило, с измененным алгоритмом управления.

Функционирование ВПС основывается на моделировании протекающих производственных процессов. Состояние ее параметров определяется для отдельных моментов времени t . При их моделировании на последующих интервалах времени, вследствие воздействия вредных факторов, могут возникнуть ситуации, когда результат оказывается недопустимо отличным от реальных параметров.

Причиной возникновения подобной ситуации являются ошибки при формировании исходной информации, непредсказуемые, внезапные изменения состояния РПС или их элементов, задействованных в ВПС и т. д. (например, внезапный отказ какого-либо технологического оборудования). Поэтому функционирование системы многообъектного технологического проектирования должно быть защищено от сбоев, что достигается резервированием и архивацией (фиксированием) промежуточных состояний системы проектирования.

При сбое системы ее восстановление осуществляется с параметрами последней архивации. Для этого предусмотрен реестр, куда регулярно заносится информация о промежуточных результатах работы системы

$$H^- = \begin{bmatrix} H_1^- \\ H_2^- \\ \dots \\ H_n^- \end{bmatrix}, \quad (8.9)$$

где H_i^- — i -й параметр, полученный в системе проектирования на последнем шаге функционирования.

Кроме того, в реестр заносится информация о получаемых параметрах на различных шагах (информация о предыстории функционирования ВПС). Такая организация позволяет перейти не только к последнему состоянию системы, но и при необходимости вернуть ее в более ранние состояния. Это может оказаться необходимым, когда получаются отрицательные результаты при неправильной организации действий системы на некотором шаге.

Таким образом, восстановление системы оказывается возможным до состояния, предшествующего моменту времени принятия «неправильного» решения и тем самым возможно исправление ошибки.

Прогнозируемость ВПС обеспечивается прежде всего наличием адекватных ММ ее составляющих элементов и моделированием процесса ее функционирования во времени. Одним из основных условий обеспечения точности прогноза является своевременное получение достоверной информации об изменении ситуации и соответствующей коррекции параметров модели на прогнозируемый период времени.

Устойчивость ВПС определяется наличием обратной связи (ОС) и нелинейностью ее характеристик (элементы оптимального управления). Наличие информации из ОС позволяет осуществлять регулярное сопоставление текущих параметров элементов РПС, составляющих ВПС, и параметров, полученных для этого этапа с помощью модели. При неадекватности полученных данных оперативно вырабатывается командная информация на коррекцию параметров модели и учет факторов, вызвавших это различие.

Управляемость ВПС может трактоваться как задача перевода системы из одного заданного состояния в другое за конечное время. Система будет управляемой, если для любых моментов времени t_0 и t_1 , $t_1 > t_0$, и любых заданных состояний z_0 и z_1 существует управление $G(t)$ на интервале времени $t_0 \leq t \leq t_1$, переводящее начальное состояние

$$z(t_0) = z_0$$

в конечное

$$z(t_1) = z_1.$$

В связи с тем что формирование РПС происходит при выполнении условия обеспечения возможности управления любым параметром состояния элементов РПС, составляющих ВПС, рассматриваемая система является полностью управляемой.

Наблюдаемость ВПС является важным свойством системы при ее управлении. Для осуществления управления (независимо от того, выполняется оно автоматически или вручную), необходимо иметь информацию о текущем состоянии системы, т. е. о значениях переменных состояния x в каждый момент времени. Однако некоторые из переменных z_i являются абстрактными переменными, не имеют физического аналога в реальной системе и поэтому не могут быть измерены. Измеряемыми и наблюдаемыми в системе являются выходные переменные H , через которые должны однозначно выражаться все составляющие вектора состояния Z .

Вектор выходной переменной можно определить как

$$H = Wz,$$

где

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1i} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2i} & \dots & w_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{nq} & w_{n2} & \dots & w_{ni} & \dots & w_{nn} \end{bmatrix}. \quad (8.10)$$

Переменная H будет наблюдаемой, если матрица W не содержит столбцов, элементы которых равны нулю.

В качестве исходных данных при моделировании процессов функционирования ВПС являются следующие показатели:

1. Продолжительность жизненного цикла ВПС.
2. Прогнозное значение периода времени, в течение которого достоверность информации, получаемой в результате моделирования, отвечает заданным условиям.
3. Ограничения (желательные уровни), определяющие соответствие процесса функционирования ВПС заданным условиям.
4. Данные по каждой доступной ПС (ресурсы, продолжительность доступа, сроки доступа).

При проектировании ТП в условиях РПС необходимо учитывать состав ПЗ. Совокупность работ (включая проектные), необходимые для изготовления некоторого вида (номенклатуры) изделий, составляющих ПЗ, можно рассматривать как отдельный проект.

Под жизненным циклом проекта будем понимать часть периода жизненного цикла изделия от момента формирования технического задания на проектирование и до момента окончания его изготовления. Можно выделить две группы ПЗ, поступающие в ВПС:

- независимые друг от друга;
- зависимые друг от друга.

К первой группе относят изделия, ТЗ на которые не зависят от результатов процесса проектирования других изделий. Период жизненного цикла проекта равен

$$T_{п.ж.ц} = T_{проект1} + T_{изгот1} \quad (8.11)$$

где $T_{п.ж.ц}$ — период жизненного цикла проекта; $T_{проект1}$ — время проектирования изделия; $T_{изгот1}$ — время изготовления изделия.

Ко второй категории относят изделия, ТЗ на которые зависят от процесса проектирования других изделий. В этом случае для процесса проектирования требуются данные, которые могут быть сформированы только на основании информации, полученной в процессе проектирования других изделий (например, базовым относительно рассматриваемого).

В этом случае период жизненного цикла проекта

$$T_{п.ж.ц} = T_{проект1} + T_{изгот} + T_{проект2} \quad (8.12)$$

Здесь $T_{проект2}$ — время проектирования связанного изделия.

Информацию об отдельных характеристиках технологического оборудования (оснастка, инструмент, станки и т. д.) можно представить в виде отдельных векторов.

Совокупность векторов, представляющих собой отдельные виды информации по отдельным составляющим ПС, можно представить как вектор ориентации ее на выпуск некоторого вида изделий

$$X = |x_1; x_2; \dots, x_i|, \quad (8.13)$$

где x_1 — вектор целевого назначения технологического оборудования ПС; x_2 — вектор целевого назначения инструмента ПС; i — отдельные виды технологической оснастки составляющих ПС.

Вектор A определяет, насколько данная ПС соответствует по своим возможностям производству конкретного изделия.

$$A = X \times Y. \quad (8.14)$$

Здесь A — вектор соответствия технологической ориентации рассматриваемой ПС; X — вектор ориентации рассматриваемой ПС на выпуск конкретного изделия; Y — вектор необходимой технологической ориентации на выпуск требуемого изделия.

Формирование ВПС начинают с определения ее структуры. Структурное моделирование является наиболее сложной областью для формализации. В большинстве систем автоматизированного проектирования основные функции структурного моделирования выполняет человек. Выполнение этих функций может осуществляться как в процессе проектирования, так и при описании предметной области. При автоматизированном проектировании объекта вначале формируется порождающая среда, в которой будет осуществляться синтез этого объекта. Порождающая среда включает данные о предметной области, к которой относится объект, о существующих и разрабатываемых структурах объекта, известные или прогнозируемые отношения и связи между элементами и свойствами объекта и внешней среды. Возможность получения в результате моделирования нескольких вариантов структур позволяет менять состав элементов структуры в зависимости от изменения внешних условий. Такими условиями могут быть:

- 1) параметры ПЗ;
- 2) наследование свойств ТП от результатов предшествующего проектирования подобных ТП;
- 3) изменение значений параметров ПС;
- 4) диалоговая корректировка результатов проектирования пользователем на основе анализа текущих требований технологического проектирования.

Информацию о свободных частях РПС можно представить в двух вариантах:

- о конкретном технологическом оборудовании РПС и сроках его возможного использования;
- о конечном результате выполнения ПЗ или его части.

В первом случае информация о свободных частях РПС представляется в виде исходных данных о свободном технологическом оборудовании,

на основе которой формируется ОПС. Далее осуществляется технологическое проектирование и реализация спроектированных ТП в сформированной ВПС.

Во втором случае сразу представляется информация о конечном результате реализации заданного ПЗ или его части в некоторой РПС без указания ее характеристик. В этом случае такую РПС можно рассматривать, как «черный ящик», в котором осуществляется ТП в оговоренные сроки при установленных условиях.

8.3. Информационные обратные связи в виртуальной производственной системе

Высокоэффективные ТП требуют наряду с использованием оборудования, выполненного с высоким качеством, управление, которое обеспечивает оптимальное их протекание по всем параметрам. При этом необходимо выполнение следующего условия:

$$F(X, X', \dots, U, U', \dots) = C(M, M', \dots; L, L', \dots, \dots), \quad (8.15)$$

где F — функция, определяющая текущие значения параметров протекания конкретного технологического процесса; C — целевая функция оптимального сочетания отдельных параметров технологического процесса в каждый момент времени, при которых наилучшим образом обеспечивается его протекание.

Различают два случая формирования исходной информации:

- текущие оптимальные значения параметров технологического процесса известны;
- текущие оптимальные значения параметров неизвестны, известны лишь конечные значения параметров или закон изменения некоторого конечного числа параметров.

Стратегию обеспечения протекания ТП с высоким качеством можно представить целевой функцией:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i(t) = \sum_{i=1}^n (G_i(t) - Y_i(t)). \quad (8.16)$$

Здесь $\delta_i(t)$ — текущее значение функции рассогласования для i -го параметра; $G_i(t)$, $Y_i(t)$ — текущие значения соответственно функции входного i -го параметра и функции выходного i -го параметра.

При оптимальном протекании ТП указанная целевая функция стремится к нулю. Целевая функция включает себя многомерную информацию по каждому параметру, его производных и одновременно носит распределенный характер, определяющийся различным физическим характером параметров, влияющих на протекание технологического процесса.

Для i -го выходного параметра можно записать выражение

$$Y_i(P) = G_i(P) \frac{\sum_{m=1}^j K_m W_i(P)}{C_i W_i(P) \sum_{m=1}^j K_m + C_i} \sum_{n=1}^L K_n, \quad (8.17)$$

где $W_i(P)$ — передаточная функция технологической системы по i -му параметру без учета действия обратной связи; K_m — коэффициент погрешности звеньев технологической системы, охваченных обратной связью; K_n — коэффициент погрешности звеньев технологической системы, не охваченных обратной связью; C_i — погрешность измерительного преобразователя информации обратной связи.

Используя теорему о конечном значении, последнее выражение можно преобразовать

$$Y_i(P) = \lim_{P \rightarrow 0} (a_i) \left[\frac{\sum_{m=1}^j K_m W_i(P)}{C_i W_i(P) \sum_{m=1}^j K_m + C_i} \sum_{n=1}^L K_n \right] = a_i(P) \frac{\sum_{n=1}^L K_n}{C_i}. \quad (8.18)$$

Полученное выражение справедливо для астатических систем по i -му управляющему воздействию, что обычно обеспечивается соответствующей организацией управления. На основе формулы (8.18) можно записать выражение для отклонения текущего i -го параметра

$$\delta_i = a_i \left[1 - \frac{\sum_{n=1}^L K_n}{C_i} \right], \quad (8.19)$$

из которого видно, что в статическом режиме величина отклонения определяется конечной точностью ММ. В динамическом режиме отклонения параметров будут определяться дополнительными динамическими ошибками, возникающими при реализации во времени управляющих воздействий в ВПС. Уменьшить указанные ошибки можно путем сравнения управляющей информации об изменениях управляющего воздействия и информации о реальной обработке этих изменений.

Процесс функционирования ВПС определяется результатами моделирования протекания ТП в ней. Ввиду не полной адекватности ММ реальной ПС результаты моделирования могут существенно отличаться от реального состояния ПС. При получении информации о параметрах РПС

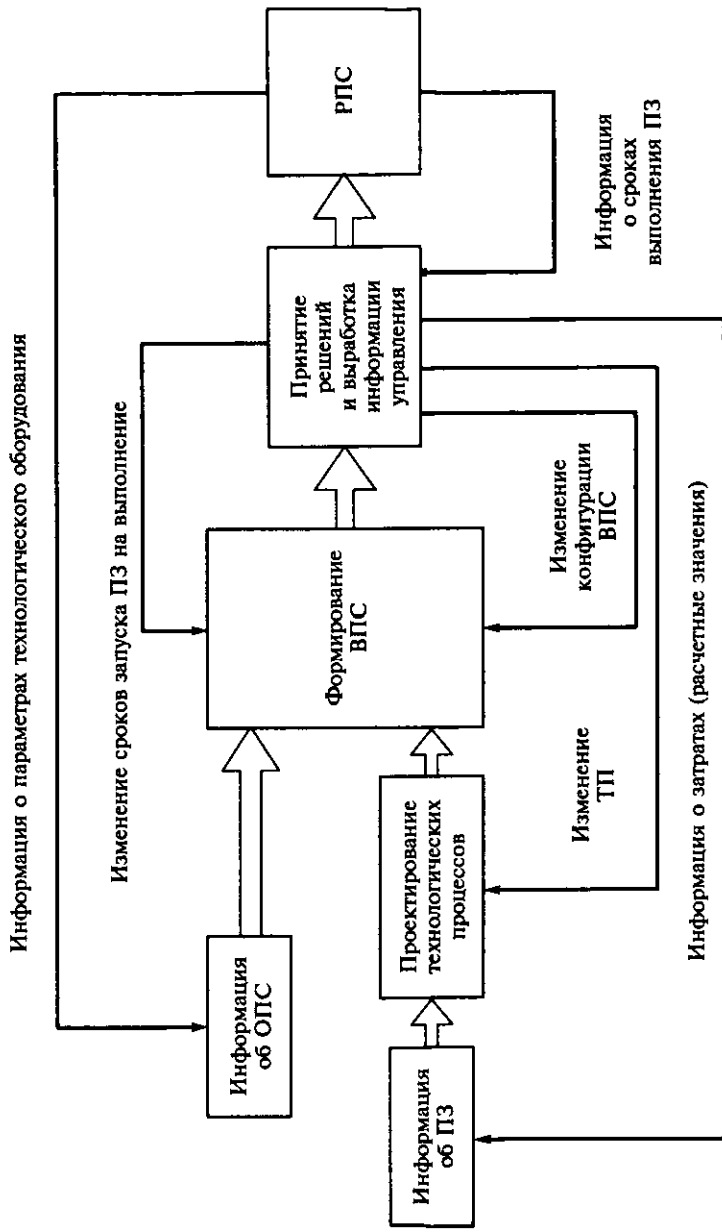


Рис. 8.8. Структура ОС в ВПС

могут возникать ошибки в информационном обеспечении, обусловленные следующими причинами:

- ошибки в определении параметров РПС (изменение состава и параметров технологической оснастки, динамическое изменение параметров элементов ПС);
- непредсказуемые изменения характеристик РПС (внезапный выход из строя отдельных технологических единиц оборудования, отказ отдельных ПС от своей части работ и др.).

Коррекция параметров модели с целью уменьшения расхождения результатов моделирования и параметров ПС обеспечивается введением ОС.

Информация ОС представляет собой обратный информационный поток, который позволяет сопоставить информацию, получаемую в результате моделирования и реального функционирования частей РПС, составляющих ВПС. На рис. 8.8 представлена структура ОС в ВПС.

Достоверность информации о параметрах технологического оборудования в РПС обеспечивается передачей данных, получаемых в результате диагностирования в них технологического оборудования. Кроме того, должно проводиться периодическое обследование технологической оснастки на предмет снижения трудоемкости переналадки и получения информации о затратах времени этой переналадки.

Информация о реальных сроках выполнения ПЗ необходима для коррекции результатов моделирования и формирования информации управления. В случае изменения реальных сроков выполнения ПЗ осуществляется коррекция исходных данных ММ функционирования ВПС и далее проводится расчет с учетом их новых значений. В этом случае может возникнуть необходимость возврата значений состояния модели к значениям на более ранний момент времени.

При принятии решения по коррекции процесса функционирования ВПС возможны следующие варианты:

- 1) корректировка размеров заготовки;
- 2) изменение маршрута обработки;
- 3) совершенствование и уточнение ТП;
- 4) корректировка процесса запуска ПЗ на выполнение;
- 5) выбор других точек ВПС, в которых осуществляется запуск ПЗ;
- 6) модификация текущей конфигурации ВПС;

7) конструкторская доработка технологической оснастки, изменение операционной технологии, оснащение станков легкопереналаживаемой, широкодиапазонной технологической оснасткой, обеспечивающей без значительной переналадки высокоточное базирование и надежное закрепление заготовки в процессе обработки;

- 8) корректировка конструкции детали.

Использование промежуточной информации о выполняемых ТП на этапах моделирования позволяет проводить ориентировочные экономические расчеты технико-экономической эффективности. На основе этих расчетов оказывается возможным на ранних этапах жизненного цикла изделия получить данные о его себестоимости и условиях производства, строить оптимальные ТП применительно к конкретным производственным условиям.

Получение информации обратной связи осуществляется следующими путями:

- промежуточная оценка проектируемых вариантов с помощью экономических расчетов;
- обследование элементов ПС (получение и уточнение параметров).

Наличие в ВПС ОС позволяет рассматривать ее как замкнутую систему. Алгоритм управления увязывается с алгоритмом функционирования системы и ее фактическим состоянием. Для этого осуществляется определение текущих значений выходных переменных $H(t)$, их сравнение с заданным $G(t)$ и выработка управляющих воздействий $E(t)$ на входы системы в зависимости от текущего отклонения ($G - H$). В системе переменные E уже не являются внешними, не зависящими от выходных переменных воздействиями и, по существу, должны рассматриваться как часть выходных переменных. К внешним воздействиям в данном случае можно отнести компоненты вектора $H(t)$.

8.4. Методы и средства моделирования процесса формирования виртуальной производственной системы

Особенностью автоматизации процесса формирования ВПС является отражение его в ММ. Под ММ ВПС будем понимать систему математических соотношений, описывающих с требуемой точностью элементы РПС и процессы их взаимодействия, их поведение в реальных условиях.

Математические модели элементов РПС, входящих в ОПС, представляют собой модели большой размерности, в которых должны учитываться ограничения и условия, во многих случаях не поддающиеся прямому аналитическому описанию. Вследствие этого такие модели часто невозможно представить в виде аналитических моделей. Поэтому при разработке ММ процессов формирования ВПС используют имитационное моделирование, которое наряду с другими методами составляет комплексную процедуру.

При имитационном моделировании применяют прямое описание моделируемых объектов. Такие модели характеризуются структурным по-

добием объекта и его модели. При имитационном моделировании проводят имитационный эксперимент, реализуемый с помощью ЭВМ. При этом ММ отражает поведение моделируемого объекта при заданных, меняющихся во времени, внешних воздействиях.

Имитационное моделирование осуществляется путем воспроизведения событий, происходящих одновременно или последовательно в модельном времени. При этом под событием понимается факт изменения любой фазовой переменной.

Основное назначение имитационного моделирования состоит в выделении наиболее существенных переменных, оценке степени их влияния на исследуемые параметры, изучении воздействия различных организационных, управленческих и технико-экономических изменений на показатели функционирования ПС и ее элементов. На основе этой информации проводят оценку получаемых решений при поиске оптимальной структуры ТП и рациональной структуры ПС, реализующей этот технологический процесс.

В имитационных моделях зависимость выходных параметров от внутренних и внешних задается неявно в виде алгоритма моделирования, который отражает процессы в системе при наличии внешних воздействий на нее. Таким образом, имитационная модель является алгоритмической поведенческой моделью.

В качестве составных частей имитационной модели используют аналитические ММ, описывающие отдельные явления в общем процессе функционирования ВПС. На основе аналитических ММ осуществляются процедуры оптимизации, посредством которых проводится поиск лучших вариантов условий функционирования ВПС.

Аналитическое моделирование целесообразно использовать в имитационных моделях, так как для него не требуются значительные затраты вычислительных ресурсов. Часто, без постановки специальных вычислительных экспериментов, разработчик может оценить характер влияния аргументов на выходные параметры, определить их оптимальные или рациональные значения. Но в большинстве случаев аналитическое моделирование реализуется в отдельных, частных случаях, сравнительно несложных процессах, имеющих место при технологическом проектировании.

Одним из важнейших разделов математической теории управления и планирования является линейное программирование. Методы линейного программирования позволяют решать оптимизационные задачи распределения ресурсов и минимизации затрат. Задачи такого рода возникают при планировании загрузки технологического оборудования ВПС, разработке методов управления в ней и планировании последовательности запуска отдельных составляющих ПЗ.

Задача линейного программирования формулируется следующим

образом. Требуется определить экстремум некоторой целевой функции переменных $X = (x_1, \dots, x_n)$

$$L(X) = L(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \max \quad (8.20)$$

при следующих ограничениях, наложенных на переменные (запись в векторной форме):

$$\sum_{i=1}^n A_i x_i \leq B, \quad x_i \geq 0, \quad i = 1 \dots n; \quad j = 1 \dots m, \quad (8.21)$$

где $A_i = \begin{pmatrix} a_{1i} \\ \vdots \\ a_{mi} \end{pmatrix}$ — i -й вектор-столбец условий задачи;

$B = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$ — вектор-столбец ограничений задачи.

Векторы A_i в совокупности образуют матрицу $A = |a_{ji}|$ условий задачи.

Если хотя бы один из коэффициентов C_i в (8.20) равен нулю, то целевая функция не ограничена в пространстве X , а ввиду этого задача о максимуме такой функции без ограничений смысла не имеет.

Другие варианты задач с линейной целевой функцией и линейными условиями можно записать в следующей форме.

1. Неравенство

$$\sum_{i=1}^n P_{i,j} x_i \geq d_j \quad (8.22)$$

можно привести к форме (8.21), изменив знак обеих его частей

$$\sum_{i=1}^n -P_{i,j} x_i \geq -d_j \quad (8.23)$$

и обозначив $a_{i,j} = -P_{i,j}$; $b_j = -d_j$.

2. Условие в форме равенства $\sum_{i=1}^n P_{i,j} x_i = d_j$ можно переписать в виде двух неравенств:

$$\sum_{i=1}^n P_{i,j} x_i \geq d_j; \quad (8.24)$$

$$\sum_{i=1}^n -P_{i,j} x_i \geq -d_j. \quad (8.25)$$

3. Условие $Y_i \geq d_i$, введя замену,

$$x_i = Y_i - d_i \quad (8.26)$$

можно переписать в следующем виде:

$$x_i \geq 0. \quad (8.27)$$

Если ограничение двустороннее

$$D_i \leq Y_i \leq L_i, \quad (8.28)$$

то оно переписывается, используя (8.26) и (8.21).

4. Замена задачи на минимум задачей на максимум проводится изменением знака L .

Сложность решения задач линейного программирования состоит в том, что прямой путь решения — построение системы возможных вариантов и выделение из них оптимального — практически неосуществим с увеличением числа переменных X_i (с увеличением i). В этом случае возникает необходимость выполнения большого количества операций, что вызывает затраты недопустимо большого объема машинного времени, даже с учетом использования современных быстродействующих ЭВМ. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо рассматривать возможность применения тех или иных методов линейного программирования, исходя из размерности конкретной задачи.

На начальных этапах технологического проектирования часто используют метод динамического программирования. Для каждого ПЗ определяют оптимальный маршрут его прохождения по отдельным рабочим местам без учета влияния других ПЗ. При этом затраты на возможную первую операцию составят

$$T_1 = f(T_1').$$

С учетом возможной второй операции

$$T_2 = f(T_2') + T_1;$$

j -й операции

$$T_j = f(T_j') + T_{j-1},$$

где j — количество технологических операций; i — количество возможных вариантов $1 \leq i \leq n$.

Функция

$$R(T_1, T_2, \dots, T_p) = \sum_{q=1}^p g(T_q') \quad (8.29)$$

является целевой функцией и определяется длительностью производствен-

ного процесса по одной конкретной изготавливаемой детали. Соответственно функция

$$G = g(T_1^i, T_2^i, \dots, T_p^i) \quad (8.30)$$

является функцией стратегии. Стратегия, максимизирующая функцию R , является оптимальной стратегией. Тогда

$$R(T_1, T_2, \dots, T_j) = \sum_{p=1}^j g(T_p). \quad (8.31)$$

Из принципа оптимальности для любого начального решения $p = 1$

$$g(T_1^i) + [g(T_2^i) + \dots + g(T_p^i)] = g(T_1^i) + F_{j-1}[f(T_1^i)]. \quad (8.32)$$

Отсюда получаем основное рекуррентное соотношение

$$R(T^i) = \min[g(T_1^i) + F_{j-1}[f(T_1^i)]], \quad (8.33)$$

которое позволяет из нескольких возможных вариантов выполнения ТП, заданных с помощью структурной модели, выбрать оптимальный вариант на основе анализа с помощью целевой функции. Реализация используемых математических методов ввиду их высокой трудоемкости должна осуществляться средствами автоматизированного комплекса.

Автоматизированный комплекс строится в рамках интегрированной программно-аппаратной среды интегральной проектно-производственной системы, или как автономное образование соответствующих подразделений на основе интеграции программного обеспечения, технологического обеспечения и средств обеспечения качества технологических процессов и изделий с использованием средств вычислительной техники.

8.5. Особенности технологического проектирования в виртуальной производственной системе

Технологическое проектирование в условиях РПС предполагает выполнение следующих условий:

- минимальная себестоимость выполняемых ТП;
- рациональное распределение во времени моментов запуска отдельных ПЗ на выполнение;
- выполнение заданных сроков выполнения ПЗ.

Большой объем технологических возможностей ОПС, превышающий объем требуемых по условиям выполнения ПЗ, позволяет осуществлять формирование различных приемлемых вариантов конфигураций ВПС. Каждая из этих конфигураций по-разному использует ресурсы ОПС при

выполнении одних и тех же ПЗ. На рис. 8.9 представлен график распределения зон используемых ресурсов ОПС во времени.

С увеличением объема ресурсов ОПС, используемых в ВПС, сроки выполнения всего объема ПЗ сокращаются. Оптимальным объемом используемых ресурсов следует считать такой, при котором сроки выполнения ПЗ совпадают с заданными.

В реальных условиях рациональным оказывается использование в ВПС объема ресурсов ОПС, при котором сроки выполнения ПЗ оказываются более короткими относительно заданных. В этом случае при возникновении непредвиденных изменений параметров РПС и (или) вследствие ограниченной точности используемых ММ исключаются срывы заданных сроков выполнения ПЗ.

Зона рационального распределения ресурсов ОПС в ВПС определяется конкретными производственными условиями и вероятностью возникновения случайных событий, влияющих на протекание производственных процессов. С целью снижения влияния случайных факторов на процесс выполнения ПЗ в некоторых случаях оказывается целесообразным формирование группы элементов ПЗ на основе основного задания (элементы ПЗ с «короткими» сроками) и части вспомогательного (элементы ПЗ с «длинными» сроками), требующего выполнения той же технологической операции. Тогда влияние случайных факторов оказывает воздействие на ход выполнения вспомогательных ПЗ, а основное ПЗ выполняется в расчетные сроки.

Проектирование ТП в условиях РПС в первую очередь предполагает синтез его структуры. Под структурой ТП будем понимать частично упорядоченную последовательность технологических установок, обеспечивающих весь процесс изготовления изделия, т. е. порядок обработки поверхностей с указанием соответствующих технологических баз. Процесс структурного синтеза определяется степенью сложности изготавливаемого изделия. Целью такого процесса является получение оптимального технологического маршрута изготовления детали, при котором достигается максимальная производительность (при обеспечении прочих заданных условий, например, себестоимость, точность и т. д.).

Частичная упорядоченность заключается в том, что некоторые установки могут объединяться в одной технологической операции, исходя из общности применяемого оборудования и схем базирования. В общем случае это синтез структуры ТП, определение состава его элементов, технологических связей между ними (топологии) и средств технической реализации (состав технологического оснащения). Порядок обработки поверхностей устанавливается в результате анализа результатов выполнения различных действий в текущей проектной ситуации, соответствующей

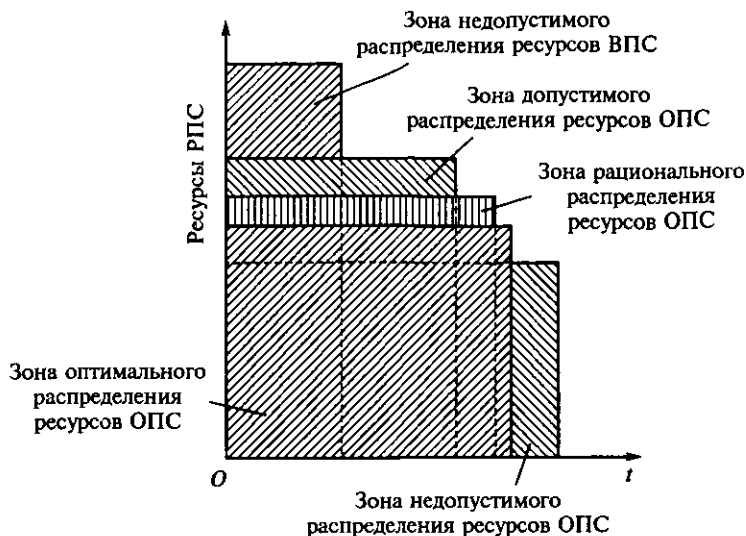


Рис. 8.9. Распределение зон используемых ресурсов ОПС во времени

шей конкретной стадии изготовления детали и определения возможных будущих ситуаций.

На основании полученного порядка обработки поверхностей строится схема ТП и осуществляется анализ соблюдения величин допусков на выполняемые размеры, расчет припусков на обработку (с проверкой соответствия их величин выбранным методам обработки) и операционных размеров. Выбирается технологическое оборудование. При удовлетворительных результатах анализа полученное проектное решение принимается. В противном случае после корректировки исходной гипотезы, например, введением дополнительной обработки некоторых поверхностей, синтезируется новый вариант структуры. В заключение окончательно формируются технологические операции при объединении соответствующих установов.

Таким образом, процесс выработки варианта проектного решения состоит из последовательных действий по выдвижению взаимоисключающих альтернатив, их оценки и собственно выбора. Задача решается одновременно на двух уровнях: выдвижения гипотезы решения задачи и подтверждения этой гипотезы. Синтез лучшего, в некотором смысле, варианта структуры или первого работоспособного варианта осуществляется методом перебора. При этом перебор является не комбинаторным, т. е. проверяются не все возможные альтернативные варианты, а осуществляется направленный поиск с исключением из рассмотрения заведомо

неприемлемых решений. Это достигается за счет использования общих знаний проблемной среды и «внутренней» модели проблемной ситуации. На основании информации, которая содержится в размерноточностных отношениях, конструктивно-геометрических свойствах детали на различных стадиях ее обработки и эвристических методах осуществляется анализ полученных результатов. На основе проведенного анализа исключаются заранее неприемлемые варианты и сужается пространство поиска. При этом решение находится за меньшее число шагов, чем потребовалось бы при полном переборе.

В условиях ВПС процесс структурного синтеза является многовариантным, что необходимо для оперативной адаптации ТП при реализации его в ее текущей конфигурации. В результате процесса проектирования могут иметь место несколько рабочих вариантов реализации одного и того же ТП. Количество таких вариантов зависит от сложности изготавливаемой детали. При проектировании создается очередной вариант одного и того же ТП, далее происходит проверка на работоспособность этого варианта с помощью целевой функции. В случае несоответствия спроектированного варианта осуществляется анализ причин несоответствия и принимается решение по изменению этого варианта в желательном направлении.

В самом элементарном случае, когда изготавливаемое изделие по своей конструкции является достаточно простым, как правило, структура ТП или его элементов (операции, переходы) уже заданы. В этом случае используют таблицы применимости.

При более сложных по своей конструкции изготавливаемых изделий генерируется набор вариантов маршрутов, из которых путем перебора вариантов счетного множества выбирается рациональный (не всегда оптимальный). При переборе каждая проба включает в себя поиск (создание) очередного варианта, принятие решения о замене ранее выбранного варианта последующим и о продолжении или прекращении поиска новых вариантов. Для полного перебора вариантов структуры из конечного множества необходимо задавать все элементы множества. Такой перечень имеет вид каталога типовых вариантов структуры (маршрутов обработки) в виде БД.

Когда вследствие сложности изготавливаемых деталей вариантов структур ТП оказывается достаточно большим, при решении задачи структурного синтеза исходят из практики использования опыта промышленности, знаний технолога и экспертных оценок. В этих случаях целесообразно формирование модели эксперта, которая включает формализованную совокупность сведений, в частности, о построении маршрутов обработки, выборе технологического оборудования, режущего инструмента, данные о применении технологии размерной обработки, закономерностей

процессов обработки и правила использования в задаваемых ситуациях этих данных для принятия новых решений.

При устоявшейся номенклатуре изготавливаемых деталей при синтезе структуры ТП (маршрута, операции) исходной информацией являются группы (подгруппы) изготавливаемых деталей. Создается БЗ (модель эксперта), включающая правила создания обобщенной структуры маршрутов операций (переходов), причем маршруты выполняемых операций (переходов) имеют типовую последовательность и содержание.

В тех случаях, когда номенклатура изготавливаемых деталей неустоявшаяся, исходную информацию целесообразно представлять в виде базового (типового) конструктива (конструктивов), изготавливаемого комплекта деталей и конструктивного обогащения (отдельных конструктивных элементов). Таким образом, процесс изготовления комплекта деталей можно представить как совокупность ТП на базовые конструктивы и переходов на обработку элементов конструктивного обогащения. Такой подход позволяет перейти к блочно-модульному принципу проектирования ТП и подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. Модель эксперта включает правила, учитывающие соотношение конструктивных признаков базового типового образа (конструктива) и конструктивных элементов обогащения, что определяет проектирование типового или единичного ТП. Синтез ТП происходит при выделении его из обобщенной структуры, или проектируется единичный ТП. Машина вывода в обоих случаях позволяет иметь альтернативные варианты, позволяющие учитывать изменяющиеся условия в ПС.

При решении задач структурного синтеза во множестве с большим, но конечным числом вариантов, при условии, что их число и содержание известны, используют алгоритмы направленного перебора (например, алгоритмы дискретного линейного программирования, алгоритмы последовательные итерационные и др.). Если это возможно, такие задачи сводят к задачам полного перебора путем ограничения области поиска на стадии формирования исходных данных.

Оптимальная стратегия обладает тем свойством, что при любом пути достижения некоторого состояния (например, технологического перехода) последующие решения должны принадлежать оптимальной стратегии для части маршрута обработки поверхности, начинающегося с этого состояния (технологического перехода). При решении подобных задач удобно использовать методы динамического программирования. Общей особенностью всех моделей динамического программирования является сведение задач принятия решений к получению рекуррентных соотношений (определение значений себестоимости на каждом шаге решения задачи, отвечающее оптимальной стратегии выбора маршрута), которые можно представить как

$$Q_n(P_i) = \text{extr}[Cp_{ij} + Q_{(n-1)}(P_j)], \quad (8.34)$$

где Q_i — себестоимость i -й операции или перехода.

Переход P_i предшествует переходу P_j . При решении задач структурного синтеза методом динамического программирования достигается нахождение оптимального варианта в условиях определенности области допустимых переходов на каждом шаге перехода.

В более сложных случаях, когда заранее определить допустимость переходов невозможно, или в условиях неопределенности состава технологических операций следует использовать экспертные системы. Экспертные системы являются типичными системами искусственного интеллекта, в которых БЗ содержит сведения, полученные от людей-экспертов в технологической области знаний. Трудности формализации процедур структурного синтеза привели к популярности применения экспертных систем при структурном синтезе ТП, поскольку в них вместо выполнения синтеза на базе формальных математических методов осуществляется синтез на основе опыта и неформальных рекомендаций, полученных от экспертов.

8.6. Разработка структуры и алгоритма процесса многообъектного технологического проектирования

Главной функцией интеллектуального управления является автоматизация процессов анализа, принятия решений и на их основе осуществление оперативного управления, в основе которого лежит использование текущей информации об управляемом объекте. Под управлением в данном случае будем понимать процесс, обеспечивающий точное и согласованное во времени взаимодействие отдельных частей и элементов ВПС, в соответствии с заранее разработанной программой управления на основе принятых решений. Методологической основой искусственного интеллекта является эвристическое программирование, при этом программа строится на базе принятых эвристик.

В процесс управления ВПС входят как составные части технологическое и организационное управления. Цель технологического управления — получение требуемых свойств изделий; цель организационного управления — формирование ВПС для реализации спроектированных ТП. Для этого необходимо обеспечение синхронизации взаимодействия ресурсов всех РПС, входящих в ОПС.

Особенностью управления в ВПС является:

- ограничение времени принятия решений;
- быстрое и частое изменение параметров ОПС.

В теории интеллектуальных систем синтез реализуется с помощью экспертных систем

$$C_3 = \langle \text{БД, БЗ, И} \rangle, \quad (8.35)$$

где БД — база данных, включающая сведения о базовых элементах; БЗ — база знаний, содержащая правила конструирования вариантов структуры; И — интерпретатор, устанавливающий последовательность применения правил из БЗ.

Системы искусственного интеллекта основаны на знаниях, отделенных от процедурной части программ и представленных в одной из характерных форм. В них используют понятия прикладной области, использование знаний в естественном виде, эксплуатация без программистов. Такими формами могут быть продукции, фреймы, семантические сети. Реально функционирующие в современных САПР системы с базами знаний чаще всего относятся к классу ЭС. Реализация систем искусственного интеллекта основывается на работе со знаниями: их представлении, хранении, использовании и т. д.

Виртуальная производственная система относится к разряду сложных систем, которые характеризуются большим числом элементов и, что особенно важно, большим числом взаимосвязей элементов. При создании ВПС имеет место смешанное проектирование — комбинацию нисходящего (имеются в наличии отдельные готовые компоненты системы) и восходящего (имеются сформулированные требования ко всей системе в целом). При таком проектировании возникает необходимость прогнозирования недостающих данных с последующим их уточнением, т. е. последовательного приближения к окончательному решению (итерационное проектирование).

Структура ММ процесса многообъектного технологического проектирования представляет собой последовательность процедур поиска рациональной конфигурации ВПС. Первоначальной процедурой в структуре является определение необходимых ресурсов ОПС с учетом требуемой технической гибкости по условиям выполнения ПЗ, с одной стороны, и минимума задействованных слоев — с другой. Поиск начинается с тех слоев, в состав которых входит специфическое технологическое оборудование, необходимое для выполнения соответствующих технологических операций (лазерная, электроэрозионная и т. д.) при изготовлении деталей, входящих в ПЗ.

Выбранные слои считаются базовыми. Далее следующей процедурой в структуре ММ является поиск (или выбор из базовых) тех слоев, которые способны обеспечить остальные, более распространенные технологические операции. Таким образом, формируется вариант компоновки ВПС.

Следующей процедурой в структуре ММ является определение наилучшего варианта последовательности запуска ПЗ в ВПС на выполнение. При этом для каждого варианта осуществляется проверка на работоспособность, исходя из заданных требований. При получении варианта, не соответствующего требованиям, происходит формирование и проверка следующего варианта и т. д. до нахождения предпочтительного.

При формировании очередного варианта сначала варьируют сроками запуска и при отсутствии положительного решения меняют конфигурацию ВПС. На первом этапе выполняется попытка нахождения наиболее предпочтительного слоя и только при отсутствии положительного результата переходят к следующему этапу — изменению количества слов. В этом случае выбор начинается со слоев, способных обеспечить наименьший прирост себестоимости изготовления (минимальные транспортные расходы, минимальная себестоимость выполнения работ и т. д.) при обеспечении необходимых технологических возможностей.

При достижении приемлемого варианта, на основе полученных данных, формируется информация управления в ВПС. В связи с большим комплексом сложных процедур в структуре ММ технологического проектирования при формировании ВПС важное место занимает правильный выбор методов моделирования, а также их комбинация в зависимости от конкретных складывающихся производственных условий.

Для поиска предпочтительных решений при формировании ВПС следует использовать эволюционные методы, основанные на статистическом подходе к исследованию ситуаций и итерационном приближении к искомому состоянию системы. Такой подход позволяет находить решения, близкие к оптимальным (рациональным) за приемлемое время.

Одним из основных эволюционных методов является метод на основе генетических алгоритмов. Использование генетических алгоритмов при формировании ВПС позволяет решать задачи с неметризуемыми управляемыми параметрами (например, лингвистические).

Представление структуры формируемой ВПС в виде хромосомы позволяет генерировать ряд ее возможных вариантов, являющихся аналогом популяции. Путем последовательных процедур таких, как кроссовер, мутации, верификация, селекция, оказывается возможно путем последовательного образования новых поколений хромосом получать варианты структур ВПС, последовательно приближающихся к оптимальному. При получении варианта структуры, удовлетворяющей заданной целевой функции, процесс считается завершенным и, полученный результат принимают за рабочий.

Формирование управляющих команд осуществляется на основе имитационного моделирования, использующего в качестве параметров модели параметров сформированной ВПС. На рис. 8.10 представлен алго-

ритм процесса ММ многообъектного технологического проектирования с интеллектуальным управлением в ВПС.

Основными процедурами алгоритма являются синтез массива технологических операций, выполнение которых необходимо для выполнения ПЗ. На основе массива технологических операций происходит формирование множества допустимых технологических маршрутов, часть которых не является оптимальными. Далее осуществляется процедура формирования рабочей конфигурации ВПС, которая является итерационной. В ходе генерации вариантов структуры проводят имитационное моделирование, по результатам которого оценивают очередной вариант на основе целевых функций. При получении рабочего варианта проводится процедура формирования командной информации и управление ВПС. В противном случае осуществляется следующая итерация на основе принимаемого решения по изменению параметров моделируемой системы.

Интеллектуализация процессов управления предусматривает формирование командной информации, базирующейся на использовании системы понятий прикладной области, использовании знаний в естественном виде, эксплуатация без программистов. Реализация концепции интеллектуализации опирается на развитые методы работы со знаниями: их представление, хранение, использование и т. д. При этом под знаниями понимают систему понятий прикладной области, а также связь с их представлениями в формальной модели; структуру данных информационной модели прикладной области; математические модели, используемые при проектировании; правила принятия решений. Интеллектуальной системе достаточно задать постановку задачи в виде требуемого результата и условий его получения. Последовательность операций, необходимых для получения результата, определяется системой автоматически.

Интеллектуальное управление в ВПС при многообъектном технологическом проектировании опирается на принятие решений после определения значений выхода имитируемой системы, при известных текущих значениях входа, параметров системы и возмущений, т. е. можно записать:

$$H = F(G, Z, U), \quad (8.45)$$

где F — оператор (программа) имитационной модели; H — вектор выходных параметров; G — вектор входных параметров; Z — вектор параметров состояния системы; U — вектор параметров возмущающих факторов.

Имитационная модель является дискретной, поэтому в моменты времени t_i переход системы из $(i-1)$ -го в i -е состояние происходит скачком и представляет собой неделимое событие. На интервале времени $[t_i, t_{i+1}]$ указанные выше параметры не меняют своих значений, полученных в момент времени t_i .

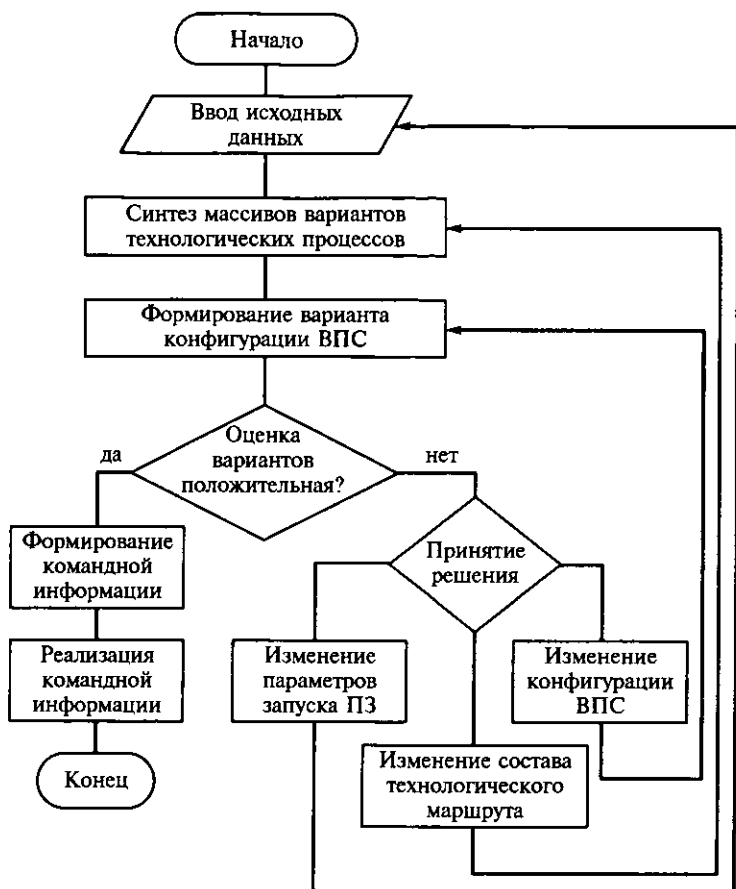


Рис. 8.10. Алгоритм ММ процесса многообъектного технологического проектирования с интеллектуальным управлением в ВПС

Входами модели дискретной ПС являются параметры ПЗ, выходом системы — информация о конфигурации ВПС и сроки запуска ПЗ в нее на выполнение. В реальных ПС имеют место возмущения, связанные с такими нештатными событиями, как сбои и отказы оборудования и оснастки. Виртуальная производственная система может находиться в одном из допустимых состояний, при котором вектор параметров состояния системы не выходит за пределы ограничений (фонд свободного времени, состав технологического оборудования используемых частей РПС и т. д.).

Для успешного формирования ВПС в РПС рекомендуется использовать CALS-технологии, которые позволяют более эффективно создавать

спецификации с информацией для программно управляемого технологического оборудования, достаточной для изготовления изделия. Этот процесс может быть распространен во времени и пространстве между многими организационно автономными проектными подразделениями.

Среди несомненных достижений CALS-технологии следует отметить легкость распространения передовых проектных решений.

Вопросы для самопроверки

1. Какие основные параметры определяют технологические возможности существующих производственных систем?
2. Каким образом формируется обобщенная производственная система?
3. Какое значение имеет ВПС для выпуска новой продукции?
4. Как влияет на производительность и себестоимость выпуска новой продукции изменение числа переходов из одного слоя в другой в ВПС?
5. Опишите последовательность определения стратегии размещения производственных заданий и последовательности их запуска в производственной системе;
6. Какое назначение и какую роль играют информационные обратные связи в ВПС?
7. Перечислите основные пути, позволяющие повысить точность ММ процесса функционирования ПС?
8. Какое значение имеет оценка ожидаемой себестоимости получаемых изделий на ранних этапах разработки ТП?
9. Каких два основных потока информации определяют процесс формирования ВПС для выполнения ПЗ?
10. Какое влияние оказывает на технологические возможности РПС применение в них оснастки, способной к быстрой переналадке и обладающей универсальностью?
11. Какие факторы снижают точность получаемых результатов моделирования процесса функционирования РПС и какими методами можно снизить их негативное влияние?
12. Что является основой для построения ВПС?
13. Опишите последовательность построения ВПС.
14. Какое влияние оказывают на процесс формирования ВПС характеристики средств вычислительной техники и правильность выбора методов математического моделирования для получения необходимой для этого формирования информации?
15. Какое влияние оказывает увеличение объема информации ОС на достоверность получаемой в результате моделирования результатов и увеличение глубины прогноза?
16. Что такое интеллектуальное управление в ВПС?
17. Какие причины определяют необходимость использования интеллектуального управления при формировании ВПС?

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

9.1. Разработка информационной модели процесса функционирования отдельного производственного модуля

Критерием эффективности при выполнении ПЗ является себестоимость и (или) производительность ТП. С одной стороны, ТП должен полностью обеспечивать выполнение всех требований рабочего чертежа и технических условий на изготовление заданного изделия, с другой — в соответствии с экономическим принципом изготовление изделия должно вестись с минимальными затратами труда и с минимальными издержками производства.

По результатам анализа возможных вариантов ТП изготовления изделия выбирают вариант, обеспечивающий наибольшую производительность и минимальную себестоимость. Из вариантов с производительностью выше или равной заданной выбирают вариант с минимальной себестоимостью. Процесс выбора осуществляется на основе информационного потока (ИП), характеризующего технологию изготовления детали (C_i) и время (t_i) запуска процесса изготовления соответствующего изделия:

$$\text{ИП} = \langle C_1, C_2, \dots, C_p, \dots, C_m; t_1, t_2, \dots, t_p, \dots, t_m \rangle, \quad (9.1)$$

где m — количество наименований изделий в ПЗ.

$$1 \leq i \leq m.$$

Каждый элемент C_i является структурно-параметрической моделью процесса изготовления изделия i -го наименования. Время запуска каждого изделия t_i определяется элементами C_i и текущим состоянием ПС (рис 9.1.). Эта часть информационного обеспечения является динамически меняющейся. Информация о текущем состоянии i -го производственного модуля содержится в информационном потоке Z_i .

Информационный поток Z представляет собой массив данных по всему парку технологического оборудования, составляющих ПС:

$$Z = \bigcup_{i=1}^{n_{r,o}} Z_i. \quad (9.2)$$

Здесь $n_{r,o}$ — число единиц технологического оборудования в ПС.

В состав информационного обеспечения C_i входят две части — постоянная, описывающая последовательность технологических операций, и переменная, описывающая тип технологического оборудования и момент запуска на нем очередной технологической операции. Первая часть информационного обеспечения формируется на основе спроектированных ТП. Вторая часть информационного обеспечения определяется текущим состоянием ПС. Эта часть информационного обеспечения является динамически меняющейся. Получение информации о текущем состоянии ПС осуществляется с помощью информационного потока Z .

Информационный поток Z представляет собой массив данных по всему парку технологического оборудования, составляющего ПС.

Каждая единица технологического оборудования ПС ориентирована на выполнение операций по поддержке определенного базового конструктива, однако целесообразно предусматривать резервирование поддержки других, допустимых по технологическим признакам, базовых конструктивов. При назначении загрузки той или иной единицы технологического оборудования исходят из заданной технологической операции обработки и из текущего состояния производственной системы. Таким образом, поставленная задача имеет характер многопараметрический с широкой вариационностью. Концептуальные решения при разработке ММ должны быть такими, чтобы эта вариация не ухудшала ее достоверность.

При построении ММ в качестве основных параметров, характеризующих состояние технологического оборудования ПС, используют:

- время освобождения технологического оборудования после завершения предыдущей технологической операции;
- время переналадки технологического оборудования с одной технологической операции на другую;
- длительность периода времени выполнения заданной операции;
- возможность использования полностью или частично элементов наладки от предыдущей технологической операции для выполнения последующей.

Основными параметрами, характеризующими ПЗ, являются:

- множество технологических операций, выполнение которых необходимо для получения каждого ПЗ;
- возможные варианты последовательностей выполнения технологических операций при выполнении каждого ПЗ;
- сроки выполнения ПЗ;

- требования к срокам выполнения ПЗ (штрафные санкции, взаимосвязь с другими ПЗ и т. д.).

Перечисленные параметры используются при выработке стратегии последовательности запуска ПЗ в ВПС. Стратегия запуска предусматривает формирование последовательности моментов времени начала изготовления отдельных ПЗ. Эта последовательность является динамическим рядом, компоненты которого могут менять порядок следования и свои значения в зависимости от складывающейся в текущий момент производственной ситуации.

При разработке стратегии запуска возникает задача динамического упорядочивания сроков запуска ПЗ, для решения которой необходима разработка ММ, отражающей процесс взаимодействия компонентов ПС при выполнении ПЗ. Реализация такой ММ с помощью ЭВМ позволяет осуществлять оперативное управление последовательностью и временем запуска того или иного ПЗ в ВПС. Управление этим процессом может осуществляться как в автоматическом режиме, так и в режиме диалога «человек—машина».



Рис. 9.1. Информационная модель функционирования отдельного производственного модуля

В этих условиях обработка данных является многопараметрической задачей в условиях динамически меняющихся параметров ПС. Спецификой поставленной задачи является ее целочисленность и, следовательно, невозможность использования традиционных методов линейного программирования. Применение методов полного или направленного перебора в подавляющем большинстве случаев оказывается невозможным в реализации вследствие большой размерности и неопределенности структуры процесса, даже с помощью высокопроизводительных ЭВМ.

С другой стороны, параметры ПС меняются согласно достаточно хорошо формализованным зависимостям и только в определенные, легко фиксируемые моменты времени. Это позволяет рассматривать процесс, как квантованный во времени. Отдельные квантованные отрезки времени имеют различную длительность, каждая из которых может быть определена на основе известных параметров ПЗ и реализующих их ПС.

Большое количество параметров, характеризующих состояние производственной системы, необходимо систематизировать. Это удобно выполнить, используя матричное представление коэффициентов, составляющих параметры производственной системы. В этом случае ММ представляется в виде двух матриц. Первая матрица Z — трехмерная (рис. 9.2), состоящая из n двумерных матриц, каждая из которых представляет совокупность свойств конкретного технологического объекта. Состояние ПС в каждый момент времени описывается двумя матрицами — Z и B .

Матрица Z является трехмерной и состоит из n слоев A_i (см. рис. 9.2). Соответственно каждый слой, характеризующий технологические возмож-

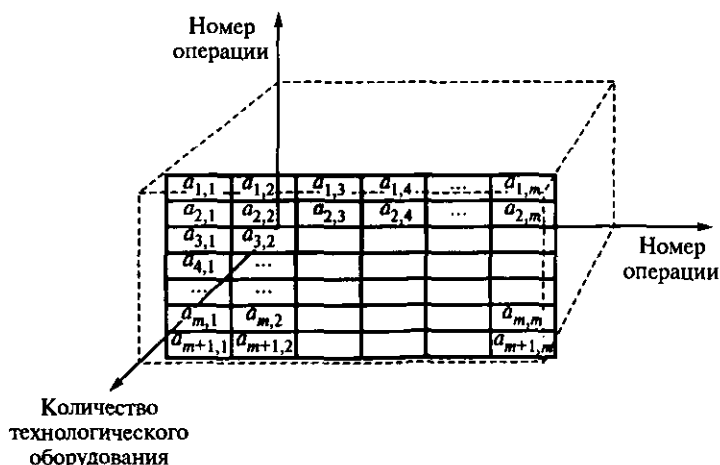


Рис. 9.2. Матрица свойств технологического оборудования производственной системы

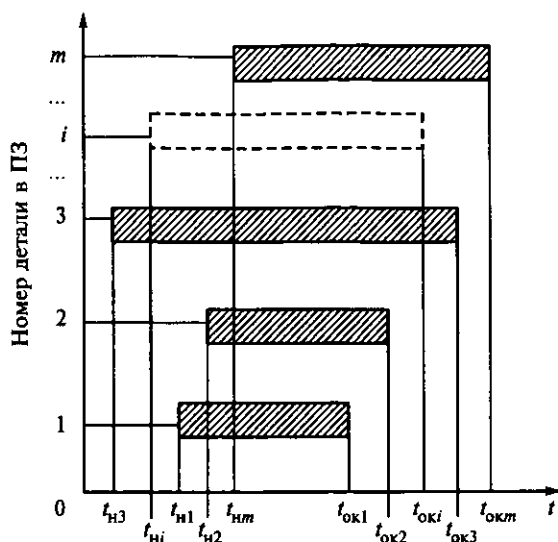


Рис. 9.3. Модель распределения производственных заданий во времени

ности конкретной единицы технологического оборудования, представляет собой двумерную матрицу одинаковой размерности $(m+1) \times m$:

$$A_i = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,m} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \dots & a_{m,m} \\ a_{m+1,1} & a_{m+1,2} & \dots & a_{m+1,m} \end{bmatrix}, \quad (9.3)$$

где m — общее количество технологических операций, которые могут быть выполнены в данной производственной системе; $a_{p,q}$ — время переналадки данного технологического оборудования с операции p на операцию q , причем $1 \leq p \leq m$, $1 \leq q \leq m$.

Одновременно

$$a_{p,q} = 0 \text{ при } p = q.$$

Последняя строка матрицы $a_{m+1,q}$ представляет собой время обработки одной заготовки на операции q .

Если технологическое оборудование i идентично технологическому оборудованию j , то выполняется условие:

$$A_i = A_j.$$

При описании свойств реального технологического оборудования отдельные члены матрицы (9.3) могут оказаться неопределенными. Это происходит в случае, если соответствующая операция не может быть на нем выполнена.

9.2. Моделирование процесса функционирования совокупности модулей

Один из наиболее важных этапов при определении рациональной загрузки технологического оборудования — поиск оптимальной стратегии распределения ПЗ в ВПС. Поиск оптимальной стратегии является многошаговой задачей и предусматривает использование итерационных методов.

При разработке методики определения оптимальной загрузки технологического оборудования необходимо учитывать, что данная задача имеет ряд особенностей:

- большую размерность задачи;
- зависимость последующей производственной ситуации не только от предыдущих условий, но и от складывающихся трудно предсказуемым образом новых условий.

Для решения поставленной задачи целесообразен метод, получивший название блочное программирование. Этот метод является совокупностью приемов, позволяющих заменить решение задач линейного программирования большого объема решением ряда линейных экстремальных задач меньшего объема. В этом случае оказывается возможным снижение необходимой мощности вычислительных процедур, обеспечение более рационального использования памяти ЭВМ, декомпозирование общей задачи на ряд задач, специфика решения которых допускает использование методов решения, непригодных для ее решения в целом.

При блочном программировании часто используют метод разложения, который является блочным аналогом метода последовательного улучшения плана. Идеи блочного программирования не только упрощают вычислительные процедуры, но в ряде случаев расширяют область применения линейного программирования.

В дальнейшем, при определении загрузки технологического оборудования, необходимо для каждого конкретного ПЗ следовать этой стратегии. Полная реализация такого подхода возможна при условии, что в любой момент времени пропускная способность ПС шире, чем требуется для одновременного обслуживания всего объема ПЗ. При этом для производственного момента времени должно соблюдаться условие

$$M_y^* \subseteq M_{n,c}^*, \quad (9.4)$$

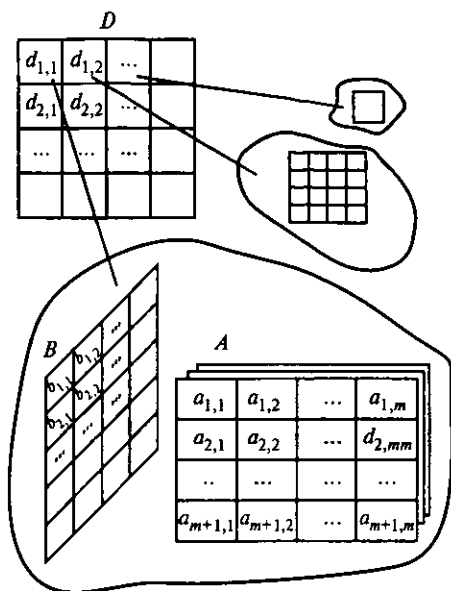


Рис. 9.4. Пространственная информационная модель взаимодействия отдельных РПС

где M_y^* — массив данных о необходимых технологических возможностях ПС для выполнения ПЗ; $M_{п.с}^*$ — массив данных технологических возможностей ПС; символ * указывает на то, что составляющие массивов взяты за малый интервал времени Δt ($\Delta t \rightarrow 0$).

При выполнении условия (9.4) время выполнения всего ПЗ определяется временем выполнения максимального по трудоемкости отдельного ПЗ. Время выполнения в этом случае будет минимальным в соответствии с технологическими возможностями оборудования ПС, на котором оно выполняется.

При невыполнении условия (9.4), но выполнении условия

$$\int_{t_1}^{t_2} M_y^* dt \leq \int_{t_1}^{t_2} M_{п.с}^* dt \quad (9.5)$$

на интервале времени t_1, t_2 , большем, чем время выполнения самого трудоемкого ПЗ, оказывается возможным выполнение всего объема ПЗ. Однако выполнение части из них будет иметь характер прерывистый во времени и выполняться, скорее всего, по неоптимальным маршрутам.

Следует отметить, что в случае обращения выражения (9.5) в равенство ПС имеет оптимальные технологические возможности для выполнения заданного ПЗ.

При невыполнении условия (9.5) данная производственная система оказывается неспособной обслуживать поступающий объем ПЗ на отрезке времени t_1, t_2 . В этом случае имеет место образование и рост очереди ПЗ на их выполнение. Если сумма времени пребывания каких-либо ПЗ в очереди и времени их выполнения превышает сроки, установленные условиями, то данная ПС не в состоянии обслуживать данный поток заказов.

Будем рассматривать задачу поиска варианта оптимальной загрузки технологического оборудования, подразумевая выполнение условия (9.5) и невыполнение условия (9.4).

При перемещении заготовки от одного технологического оборудования к другому затрачивается время, которое определяется их относительным расположением на производственных площадях. Время перемещения заготовок между технологическим оборудованием можно представить в виде матрицы B . Эта матрица имеет размерность $(n+2) \times n$:

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \dots & b_{1,n} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \dots & b_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n,1} & b_{n,2} & \dots & b_{n,n} \\ b_{n+1,1} & b_{n+1,2} & \dots & b_{n+1,n} \\ b_{n+2,1} & b_{n+2,2} & \dots & b_{n+2,n} \end{bmatrix}, \quad (9.6)$$

где n — общее количество технологического оборудования, составляющего производственную систему; $b_{p,q}$ — время перемещения заготовок от p -го технологического оборудования к q -му; $1 \leq p \leq n$; $1 \leq q \leq n$, причем $b_{p,q} = 0$ при $p = q$.

Строка $n+1$ содержит информацию о времени доступа к q -му технологическому оборудованию и определяет время завершения на нем предшествующей операции. Компоненты этой строки являются динамически меняющимися.

Последняя строка $n+2$ содержит информацию о приоритете производственного заказа, выполняемого на данном технологическом оборудовании. Кроме того, в данную строку при необходимости заносится информация о потере работоспособности этого оборудования в текущий момент времени. Например, если данное технологическое оборудование не функционирует по причине проведения ремонтных работ, то в соответствующий элемент строки $n+2$ записывается признак занятости по высшему приоритету, а в строке $n+1$ — время доступа, соответствующее предполагаемому времени проведения ремонтных работ.

При поиске варианта оптимальной загрузки технологического оборуду-

дования следует исходить из сроков запуска каждого ПЗ и учитывать его оптимальный маршрут. При планировании загрузки технологического оборудования ПЗ с более ранним сроком поступает на технологическое оборудование согласно его маршруту обработки. Далее выбирается следующий ПЗ с более поздним сроком запуска и ему назначается технологическое оборудование согласно его оптимальному маршруту и т. д. Наконец, для очередного ПЗ складывается ситуация, когда в связи с загрузкой технологического оборудования более приоритетными заказами оказывается невозможным обеспечить выполнение технологической операции согласно его оптимального маршрута. Тогда этот ПЗ направляется на свободное технологическое оборудование, для которого соблюдается условие

$$F(b_{n+1,k} + b_{k1,k} + a_{m+1,j} n_{ci} + a_{ij}^k) \rightarrow \min, \quad (9.7)$$

где $b_{n+1,j}$ — члены матрицы (9.6); $a_{m+1,j}$ — члены матрицы (9.3).

Выбор наилучшего варианта осуществляется в среде не только свободного технологического оборудования, но и в среде технологического оборудования, занятого ПЗ, с более низким уровнем приоритета. В случае если целесообразным оказывается использование технологического оборудования, занятого заказом с более низким приоритетом, выполнение этого заказа и его место занимает заказ с более высоким приоритетом.

Очередной шаг Δt квантования по времени в ММ определяется как минимальный из ряда времен доступа к тому или иному технологическому оборудованию:

$$\Delta t = \min (b_{n+1,1}, b_{n+1,2} \dots b_{n+1,n}). \quad (9.8)$$

Здесь $b_{n+1,j}$ — члены матрицы (9.6).

После определения значения Δt все коэффициенты ряда (9.8) уменьшаются на эту величину, и далее процесс повторяется.

$$\begin{cases} B_{n+1,i} = B_{n+1,i} - \Delta t & \text{при } B_{n+1,i} \geq \Delta t; \\ B_{n+1,i} = 0 & \text{при } B_{n+1,i} < \Delta t. \end{cases} \quad (9.9)$$

Таким образом, обеспечиваются условия для обработки срочных заказов, близкие к оптимальным. Остальные заказы выполняются в режиме прохождения по мере освобождения технологического оборудования. Значимость этого режима для каждого конкретного ПЗ определяется его приоритетом.

При моделировании процесса загрузки технологического оборудования на каждом шаге осуществляется фиксация времени поступления производственных заказов на выполнение. Если на некотором этапе оказывается, что замещенный технологический процесс выполнения конкретного ПЗ по своей длительности не обеспечил выпуска хотя бы одной

детали, осуществляется возврат к этому моменту времени и снятие этого технологического процесса из рассмотрения на этом этапе.

Аналогично поступают и при появлении нового ПЗ. Возврат к соответствующему моменту времени предусматривает пересчет состояния ПС в той части, которая меняется, исходя из сроков запуска вновь поступившего ПЗ. В частности, если его сроки более ранние, происходит полный пересчет загрузки технологического оборудования, если более поздние, то пересчет вообще не производится.

9.3. Моделирование процесса назначения очередности поступления заданий в производственную систему

Производственные задания на изготовление деталей поступают в виде технологической документации. Часто время их поступления носит случайный характер. Для эффективной работы ПС необходимо упорядочивание ПЗ и систематизация порядка их следования. Ввиду произвольного порядка поступления ПЗ такая система должна обладать достаточной гибкостью. Действительно, в более ранний момент времени может поступить ПЗ, который имеет длительный срок изготовления. В более поздний момент времени может поступить срочный ПЗ с малым, «жестким» сроком изготовления.

Непосредственно формирование структуры ПЗ осуществляется на основе следующих их свойств:

- момент времени поступления ПЗ;
- требования к времени изготовления;
- трудоемкость изготовления;
- вид детали, определяющий технологию ее изготовления.

На основании этих свойств осуществляется ранжирование ПЗ. Основным критерием процедуры ранжирования является количество технологических операций, выполнение которых необходимо для получения готовой детали.

Ниже приведены выбранные критерии, на основании которых разрабатывается структура БД:

- 1) уровень приоритета ПЗ;
- 2) количество оставшихся операций, необходимых для получения готовой детали.

Все ПЗ ранжируются в последовательности и в соответствии с этими критериями. Последний критерий имеет целью сокращения времени нахождения ПЗ с малым числом оставшихся невыполненных технологических операций в производстве. Это позволяет уменьшить объем незавершенного производства. На рис. 9.3 представлена модель распределения производственных заданий во времени.

Общий объем информации о ПЗ, одновременно находящихся в ПС, можно представить как совокупность информационных массивов:

$$C = (C_1^1; C_2^1; \dots; C_{i1}^1; C_1^2; C_2^2; \dots; C_{i2}^2; C_1^3; C_2^3; \dots; C_{i3}^3), \quad (9.10)$$

где C_i^j — информационный массив данных о i -м производственном заказе j -го уровня приоритета; j — уровень приоритета производственного заказа; i — порядковый номер производственного заказа на своем уровне приоритета.

Структура отдельно взятого информационного массива представляет собой одномерную матрицу вида

$$C_i^j = |V_{1i}; V_{2i}; \dots; V_{ki}; \dots; V_{ni}|. \quad (9.11)$$

Здесь V_i — вид технологической операции; N_i — общее количество операций, которые необходимо выполнить, чтобы получить готовую деталь типа C_i^j .

Структура матрицы является динамически меняющейся и, в процессе выполнения технологических операций, количество ее элементов уменьшается. Кроме того, изменяется и массив C , так как отдельные ПЗ могут менять свое положение. Это происходит вследствие того, что ПЗ внутри каждого уровня приоритета расположены согласно увеличению количества оставшихся технологических операций, необходимых для полного изготовления каждого из них готовой детали и при изменении их количества у какого-либо заказа меняется его положение в общем ряду, т. е. в каждый момент времени должно выполняться условие

$$l_1 \leq l_2 \text{ при } N_{i1} < N_{i2}.$$

Количество и состав компонентов в выражении (9.11) меняется по мере выполнения отдельных технологических операций, поступления новых производственных заказов и их выполнения.

На рис. 9.3 отражено распределение времени выполнения деталей отдельных ПЗ. При появлении нового ПЗ определяется его положение относительно поступивших ранее. Далее осуществляется упорядочивание ПЗ в сформированном ряду. Если присутствует некоторое количество ПЗ с аналогичными параметрами, то проводится сравнение числа операций последовательно с каждым, начиная с первого. Как только обнаруживается в рассматриваемом ряду ПЗ с числом операций, большим, чем у вновь поступившего, вновь поступившему присваивается этот номер, а всем остальным, начиная с сравниваемого, номер увеличивается на 1.

Изменения вносятся в двух случаях:

- поступил новый ПЗ;
- закончилась очередная технологическая операция.

Таким образом, на основе вышесказанного разработаны ММ и соответ-

ствующие алгоритмы формирования структуры ПЗ, реализация которых с помощью ЭВМ позволяет автоматизировать процесс ранжирования ПЗ.

При определении очередности поступления ПЗ на выполнение необходимо определить время запуска $t_{\text{зап}}$ каждого из них. Каждый из ПЗ имеет свой срок окончания выполнения $t_{\text{зав}}$ и длительность его выполнения $t_{\text{изгот}}$.

Таким образом, можно записать для всего ПЗ:

$$\begin{cases} t_{\text{зап}}^1 \leq t_{\text{зав}}^1 - t_{\text{изгот}}^1; \\ \dots\dots\dots \\ t_{\text{зап}}^m \leq t_{\text{зав}}^m - t_{\text{изгот}}^m, \end{cases} \quad (9.12)$$

где m — общее количество видов продукции в ПЗ.

Оптимальным вариантом является случай, которому соответствует равенство в формуле (9.12). Однако на практике этот случай труднодостижим. В реальных производственных условиях записанные условия имеют вид

$$\begin{cases} t_{\text{зап}}^1 \leq t_{\text{зав}}^1 - t_{\text{изгот}}^1 - t_{\text{незав}}^1 - t_{\text{доп}}^1; \\ \dots\dots\dots \\ t_{\text{зап}}^m \leq t_{\text{зав}}^m - t_{\text{изгот}}^m - t_{\text{незав}}^m - t_{\text{доп}}^m. \end{cases} \quad (9.13)$$

Здесь $t_{\text{незав}}$ — время, в течение которого незавершенное изделие в виде полуфабриката находится вне производственного процесса (ожидание освобождения требуемого технологического оборудования, вынужденный простой по организационным и другим причинам и т. д.).

Уменьшить время на выполнение ПЗ можно за счет снижения $t_{\text{незав}}$ и $t_{\text{доп}}$. Величина $t_{\text{незав}}$ определяется результатами технологического проектирования в ВПС. Величина $t_{\text{доп}}$ — эмпирическая величина, определяемая затратами времени, связанные с такими мероприятиями, как приобретение заготовок, выполнение операций на технологическом оборудовании и т. п.

Определение момента запуска i -го задания в ПЗ должно осуществляться по результатам определения значения $t_{\text{зап}}^i$, где $1 \leq i \leq m$.

Для сокращения величины $t_{\text{незав}}$ необходимо осуществлять управление ресурсами ВПС таким образом, чтобы максимально снизить преждевременное выполнение ПЗ относительно его сроков.

9.4. Моделирование процесса функционирования технологического оборудования виртуальной производственной системы

Виртуальную производственную систему можно представить в виде некоторой совокупности свойств Z отдельных технологических единиц оборудования

$$Z = (A_1; A_2; \dots; A_k; \dots; A_n), \quad (9.14)$$

где A_k — некоторая совокупность технологических свойств i -го технологического оборудования, причем $1 \leq k \leq n$ (n — общее количество единиц технологического оборудования, образующих производственную систему).

Технологические возможности производственной системы можно представить в виде информационного массива $M_{пс}$, представляющего технологические операции, которые могут быть выполнены в данной производственной системе:

$$M_{пс} = \bigcup_{i=1}^n A_i. \quad (9.15)$$

Здесь A_i — массив технологических возможностей i -й единицы технологического оборудования производственной системы.

При этом должны выполняться следующие условия.

1. Массив технологических возможностей производственной системы должен включать в себя технологические требования базовых конструктивов и обогащений. В противном случае ПЗ может быть выполнено лишь частично.

2. Множество, образованное технологическими возможностями ПС, не должно существенно превышать множество, образованное технологическими требованиями базовых конструктивов и конструктивных обогащений. В противном случае возникает избыточность, которая приводит к снижению эффективности функционирования производственной системы.

3. Технологические возможности отдельных единиц технологического оборудования могут частично перекрываться (например, цилиндрическая поверхность может быть получена как при использовании токарного оборудования, так и фрезерного, расточного, обрабатывающих центров и т. д.).

Следовательно, при выполнении перечисленных условий

$$M_y \subseteq M_{пс}, \quad (9.16)$$

где M_y — множество технологических операций, необходимых для обобщенной структуры технологических процессов.

При несоблюдении этого условия (9.16) часть технологических операций, необходимых для выполнения конкретных производственных за-

казов, окажется невозможной для реализации. Одновременно мощность пересечения этих множеств должна быть максимальной.

Плотность распределения конкретных технологических операций множества технологических возможностей должна соответствовать плотности распределения требующихся технологических операций, необходимых для обеспечения текущей совокупности производственных заказов. Другими словами, ПС должна быть способной обеспечить одновременное проведение однотипных операций без образования «узких» мест. В противном случае наблюдается снижение эффективности функционирования производственной системы и уменьшение производительности.

При разработке ММ ПС в качестве выходного параметра необходимо выбрать время обслуживания каждого ПЗ на отдельных операциях, так как именно время обслуживания определяет производительность ВПС. Этот параметр зависит от типа операции и технологического оборудования, на котором она выполняется. Конкретный тип технологического оборудования определяет время на транспортировку, переналадку и выполнение операции. Время на переналадку определяется временем на разналадку с предыдущей операции и время на наладку для проведения следующей операции. В общем случае формула для расчета времени выполнения очередной технологической операции имеет вид

$$T_j^k = t_{i1}^k + t_{j1}^k + t_{a1,a} + t_j^k n, \quad (9.17)$$

где T_j^k — время на выполнение j -й операции на k -м оборудовании; t_{i1}^k — время на разналадку k -го оборудования с предыдущей операции; t_{j1}^k — время на наладку k -го оборудования для выполнения j -й операции; $t_{a1,a}$ — время на транспортировку производственного заказа с A_{k1} на A_k оборудование; t_j^k — время обработки одной заготовки; n — число заготовок в производственном заказе.

Для конкретного технологического оборудования формулу (9.17) можно преобразовать к следующему виду:

$$T_j = t_{i1} + t_{j1} + t_j n. \quad (9.18)$$

Время на переналадку с одной операции на другую лежит в пределах:

$$0 \leq t_{i1,j1} \leq t_{i1} + t_{j1}. \quad (9.19)$$

Здесь $t_{i1,j1}$ — время переналадки технологического оборудования с $i1$ -й операции на $j1$ -ю операцию.

Величина времени переналадки $t_{i1,j1}$ определяется степенью преемственности технологической наладки от предыдущей операции к последующей в рамках одного и того же оборудования.

Время получения партии готовых деталей типа C_i можно определить по формуле

$$T = \sum_{j=1}^N T_j^i, \quad (9.20)$$

где N — число операций, необходимых для изготовления одного изделия.

Используя полученные выражения (9.3) и (9.6), можно записать выражение для времени выполнения j -й операции для некоторой C_i -й заготовки на k -м технологическом оборудовании:

$$T_j^k = b_{n+l,k} + b_{kl,k} + a_{m+l,j} n_{ci} + a^k_{lj}. \quad (9.21)$$

Здесь $b_{n+l,k}$ — время, в течение которого освобождается k -е технологическое оборудование; $b_{kl,k}$ — время перемещения заготовок от места предшествующей обработки (оборудование k_l) и последующей (оборудование k); $a_{m+l,j}$ — время обработки одной заготовки типа C_i ; n_{ci} — количество заготовок в партии типа C_i ; a^k_{lj} — время переналадки k -го технологического оборудования с предшествующей технологической операции l на следующую j .

Таким образом, на основе разработанной модели состояния ПС получена целевая функция

$$\sum_{j=1}^n T_j^k \rightarrow \min. \quad (9.22)$$

При выполнении этого условия повышается коэффициент загрузки технологического оборудования и производительность производственной системы в целом.

При невозможности выполнения всей совокупности технологических операций в единой части РПС возникает необходимость перемещения полуфабриката в другую РПС. В этом случае возникают дополнительные затраты и, в частности, времени. Определить затраты времени на перемещение полуфабриката из одной РПС в другую можно, используя пространственную информационную модель, представленную на рис. 9.4.

Пространственная модель представляет собой матрицу D , структура которой описывает взаимосвязь между отдельными РПС, представленными матрицами (9.3) и (9.6) (см. рис. 9.4). Параметры матрицы D представляют собой затраты времени на перемещение полуфабриката из одной РПС в другую. При возникновении необходимости такого перемещения формула (9.21) приобретает вид

$$T_j^k = b_{n+l,k} + b_{kl,k} + a_{m+l,j} n_{ci} + a^k_{lj} + d_{r,p}, \quad (9.23)$$

где $d_{r,p}$ — время, затрачиваемое на перемещение полуфабриката из r -й РПС в p -ю.

Исходя из требований максимального снижения затрат на выполнение ПЗ, необходимо при формировании конфигурации ВПС стремиться находить варианты, исключаящие необходимость перемещения полуфабрикатов между отдельными РПС.

9.5. Формирование информационного обеспечения математических моделей функционирования технологического оборудования виртуальной производственной системы

Информационное обеспечение ММ разрабатывается путем определения параметров, входящих в эти модели. Для снижения объемов вычислительных процедур при их получении необходимо использовать математические методы с минимальной трудоемкостью вычислений, осуществляемые средствами вычислительной техники.

При описании элементов ВПС системами многомерных линейных уравнений ее представляют в следующем виде:

$$A x = B, \quad (9.24)$$

где A — матрица размерностью $(n \times n)$ с постоянными коэффициентами; B — n -мерный вектор известных констант; x — n -мерный вектор неизвестных, т. е.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}. \quad (9.25)$$

Матрицу коэффициентов A можно представить в виде произведения двух матриц L и U :

$$A = L U, \quad (9.26)$$

где

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & & & & \\ l_{21} & l_{22} & & & 0 \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} & & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ l_{n1} & l_{n2} & l_{n3} & \cdots & l_{nn} \end{bmatrix} \quad (9.27)$$

и

$$U = \begin{bmatrix} 1 & u_{12} & u_{13} & \cdots & u_{1n} \\ & 1 & u_{23} & \cdots & u_{2n} \\ & & 1 & \cdots & u_{3n} \\ & & & \ddots & \\ & 0 & & & 1 \end{bmatrix}. \quad (9.28)$$

Тогда выражение (9.23) можно представить в виде

$$L U x = B. \quad (9.29)$$

Введем обозначение:

$$z = U x.$$

В этом случае выражение (9.28) примет вид

$$L z = B.$$

Учитывая выражение (9.24), можно записать

$$\begin{aligned} l_{11}z_1 &= b_1; \\ l_{21}z_1 + l_{22}z_2 &= b_2; \\ l_{31}z_1 + l_{32}z_2 + l_{33}z_3 &= b_3; \\ &\vdots, \\ l_{n1}z_1 + l_{n2}z_2 + \dots + l_{nn}z_n &= b_n, \end{aligned} \quad (9.30)$$

откуда

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{b_1}{l_{11}}; \\ z_2 &= \frac{b_2 - l_{21}z_1}{l_{22}}; \\ z_3 &= \frac{b_3 - l_{31}z_1 - l_{32}z_2}{l_{33}} \end{aligned} \quad (9.31)$$

или в общем виде

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{b_1}{l_{11}}; \\ z_i &= \frac{b_i - \sum_{j=1}^{i-1} l_{ij}z_j}{l_{ii}}, \end{aligned} \quad (9.32)$$

где $i = 2, 3, \dots, n$.

Таким образом, определив значения элементов матрицы z , можно определить значения коэффициентов матрицы X :

$$\begin{aligned} x_1 + u_{12}x_2 + u_{13}x_3 + \dots + u_{1n}x_n &= z_1; \\ x_2 + u_{23}x_3 + \dots + u_{2n}x_n &= z_2; \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \vdots \\ x_{n-1} + u_{n-1,n} x_n &= z_{n-1}; \\ x_n &= z_n. \end{aligned} \quad (9.33)$$

Для определения компонентов X_n , начиная с последнего уравнения, последовательно находим их значения. В общем виде их определяют по следующей формуле:

$$\begin{aligned} x_i &= z_i - \sum_{j=i+1}^n u_{ij} x_j; \quad i = n-1, n-2, \dots, 1; \\ x_n &= z_n. \end{aligned} \quad (9.34)$$

Этот процесс является обратной подстановкой. Число операций, требуемых для выполнения как прямой, так и обратной подстановок, равно примерно $n^2/2$. В сумме для решения требуется n^2 операций. Анализ системы уравнения (9.32) показывает, что компоненты b_i используются только для определения величин z_i и позднее не требуются. Аналогично в (9.33) величина z_i не нужна после вычисления переменных x_i . Следовательно, при такой системе расчетов векторы b , z и x могут быть размещены в одних и тех же ячейках памяти ЭВМ.

Элементы матриц L и U определяют по следующим формулам:

$$l_{ik} = a_{ik} - \sum_{m=1}^{k-1} l_{im} u_{mk}, \quad i \geq k; \quad (9.35)$$

$$u_{kj} = \frac{a_{kj} - \sum_{m=1}^{k-1} l_{km} u_{mj}}{l_{kk}}, \quad j \geq k. \quad (9.36)$$

Требуемые в этих выражениях значения элементов матриц L и U рассчитывают на предыдущих этапах процесса. Далее, каждый элемент a_{ij} матрицы A требуется для вычисления только соответствующих элементов матриц L и U .

Вопросы для самопроверки

1. Какой критерий эффективности применяют при выполнении производственного задания?
2. Какие основные параметры, характеризующие состояние технологического оборудования, используют при построении ММ?
3. В чем суть моделирования процесса функционирования производственного модуля?
4. Как пользуются матрицей свойств технологического оборудования производственной системы?

5. В чем заключается распределение периода изготовления производственного задания во времени?
6. Как определить момент запуска i -го задания?
7. Как представляют технологические возможности производственной системы?
8. Как определяют время на переналадку оборудования?
9. Чем характеризуется информационная модель взаимодействия отдельных распределенных производственных систем?
10. В чем заключается информационное обеспечение ММ?
11. Что необходимо для оперативной обработки информации?
12. Для чего проводят регулярный анализ возможности технологического оборудования?
13. Для каких целей используется технологическая оснастка с высокой гибкостью?
14. Для чего нужна система с элементами интеллектуализации?

Глава 10

МНОГООБЪЕКТНОЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В ВИРТУАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ

10.1. Основные этапы многообъектного технологического проектирования

Решение задачи сокращения времени на технологическую подготовку производства и выпуск новых изделий, особенно малыми партиями, снижает как себестоимость изготовления новой продукции, так и время от появления новых конструкторских разработок до их внедрения в промышленные образцы. Это, в свою очередь, обеспечивает повышение их конкурентоспособности и позволяет оперативно реагировать на изменение потребительского спроса. Для решения этой задачи необходимо определить совокупность необходимых методов и средств образования маршрутов проектирования — последовательностей проектных операций и процедур, ведущих к достижению поставленной цели. При этом методы построения последовательностей проектирования определяются типом проектных задач.

Основой для осуществления многообъектного технологического проектирования служат уже существующие РПС, ориентированные на выпуск своих ПЗ и имеющих фонд свободного времени своего технологического оборудования. Технологическое оборудование, имеющее фонд свободного времени, является ресурсами ПС, необходимыми для функционирования ВПС. На основе информации о ресурсах ПС оперативно формируется конфигурация (возможно изменяющаяся во времени), максимально соответствующая требованиям выполняемых ПЗ. Особенность такого подхода состоит в использовании элементов интеллектуального управления, позволяющего принимать решения по изменению конфигурации ВПС и формированию управляющей информации в реальном масштабе времени с минимальным участием человека-оператора.

Многообъектное технологическое проектирование с интеллектуаль-

ным управлением в РПС включает в себя: методики проектирования ТП, методику обеспечения целеустремленной генерации возможных вариантов конфигурации ВПС, методику осуществления верификации сгенерированных вариантов и отбора лучших, а также методику принятия решения, на основе которого осуществляется управление процессом конфигурирования ВПС во времени. В связи с тем что принятие решения и формирование на его основе управляющего воздействия происходит на основе сложных творческих процессов, управление должно строиться как интеллектualmente.

Таким образом, концептуальная идея построения ВПС заключается в мобильной организации временно функционирующих объектно-ориентированных ПС для выполнения текущих ТП на базе РПС. Другими словами, при наличии некоторого ПЗ необходима стратегия выполнения их в РПС, имеющих фонд свободного времени и ориентированных, в свою очередь, на выпуск других, различных по своим параметрам изделий. При этом выполнение спроектированных ТП не должно негативно сказываться на сроках и себестоимости выпуска основной для этих РПС продукции.

Реализация идеи достигается за счет формирования ВПС рациональной конфигурации, позволяющей выполнять ПЗ в сроки, не превышающие заданные, но близкие к ним и с минимальной себестоимостью. Такой подход обеспечивает отсутствие материальных перестроек при формировании ПС для выполнения ПЗ, минимальные затраты на хранение готовой продукции и минимальные объемы используемых ресурсов ОПС. Использование свободного технологического оборудования РПС, ориентированных на выполнение своих плановых технологических процессов, обеспечивает существенное снижение времени и трудоемкости технологической подготовки производства.

Данные о предметной области, к которой относится объект, о существующих и разрабатываемых его структурах, известные или прогнозируемые отношения и связи между элементами и свойствами объекта и внешней среды представляют собой порождающую среду. Совокупность информационных потоков, образованных информацией о ПЗ и ОПС, образуют порождающую среду, необходимую для генерации вариантов конфигураций ВПС. Порождающая среда представляет собой систему сущностей OS , которую можно представить в следующем виде:

$$OS = (\{(sa_i, SA_i) \mid i \in N_n\}, \{sb_j, SB_j\} \mid j \in N_m\}), \quad (10.1)$$

где sa_i и SA_i — соответственно свойство и множество его проявлений; sb_j , SB_j — база и множество ее элементов; $N_n = \{1, 2, \dots, n\}$ и $N_m = \{1, 2, \dots, m\}$; n — число единиц технологического оборудования в ВПС; m — число видов изделий в ПЗ.

Совокупность отношений можно представить в виде множеств $D_1, D_2, \dots, D_N$, тогда R является отношением над этими множествами, если R есть множество упорядоченных последовательностей (n кортежей) вида $\langle d_1, d_2, \dots, d_n \rangle$, где d_1 — элемент из D_1 ; d_2 — элемент из D_2 ; ...; d_n — элемент из D_N . Множества $D_1, D_2, \dots, D_N$ являются доменами отношения R .

Отношение R состоит из некоторого числа кортежей, соответствующих числу элементов в ПЗ, и представляет собой мощность. Отношение R можно представить в виде табличной функции. Такое представление предопределяет использование реляционных БД.

При совместном использовании БЗ и БД особое значение имеют операции выбора и проекции. По значениям атрибутов, рассчитанных на основе информации, полученной из БЗ, с помощью этих операций проводится отбор необходимой информации из БД.

На этапе принятия решения, в соответствии с требованиями и ограничениями более высокого уровня, принимается решение о выполнении некоторого объема ПЗ. На этапе проектирования проводится анализ выбранного ПЗ, разработка ТП в виде набора маршрутов, описаний и т. п., выбор оборудования, оснастки и т. п. На этапе планирования составляется план изготовления по соответствующей технологии на технологическом оборудовании, составляющем ВПС. На этапе приобретения осуществляется фактическое приобретение сырья, полуфабрикатов, комплектующих, информации, необходимых для производства продукта по соответствующей технологии. На этапе производства реализуется план изготовления деталей, в результате которого выполняется ПЗ. На этапе контроля качества готового продукта осуществляется сравнение продукта с его спецификацией и извещение о несоответствии, если таковые имеются. На этапе поставки готовый продукт, прошедший контроль качества, направляется потребителю.

Функции, выполняемые на перечисленных этапах, взаимосвязаны и могут использовать общие или различные данные.

При решении задачи формирования ВПС необходимо создание и использование БД, содержащих информацию, полученную на основе научных положений технологии машиностроения; методах математического моделирования, системно-структурного анализа; теорий информации, множеств, математической логики, управления, автоматизированного проектирования и технологии программирования.

Модель системы многообъектного технологического проектирования позволяет не только представить функции и виды деятельности в автоматизированном производстве, но является основой для его системного проектирования. Модель базируется на понятии «управляемое динамическое производство», в которой выполняются следующие последовательные этапы: принятие решения, оценка конструкции, технологи-

ческое проектирование, верификация, контроль прохождения ПЗ через ВПС.

Математическая реализация моделей функционирования ВПС учитывает, что современное гибкое автоматизированное производство базируется на массовом применении вычислительной техники, начиная от ГПМ, имеющих, как правило, встроенные микропроцессоры, и кончая автоматизированными рабочими местами конструкторов, технологов, диспетчеров, и т. д. В силу физической распределенности этих компонентов объективно возникает задача создания соответствующей распределенной вычислительной системы ЭВМ, охватывающей участки, цехи, заводы, отрасли и т. д.

Эффективность управления реальной ПС зависит от последовательности и значений принимаемых решений, а также от оперативности получаемой информации. Для принятия необходимых решений требуется получение соответствующей информации о ПС в реальном времени, а также о прошлом или возможном будущем. Ввиду ограниченности времени на обработку поступающей информации анализ складывающейся производственной ситуации и формирование соответствующей команды управления требуется автоматизация выполнения указанных действий. Это приводит к необходимости использования моделей, имитирующей основные действия оператора при управлении ПС. Такая система должна обладать элементами интеллектуального управления.

На рис. 10.1 представлена структурная модель процесса определения конфигурации ВПС. Генерация вариантов осуществляется на основе эволюционного метода, использующего генетические алгоритмы. Для реализации генерации вариантов был выбран подход, получивший название метод комбинирования эвристик. Этот метод позволяет уменьшить требуемую вычислительную мощность всего генетического алгоритма в целом.

По завершении формирования очередных вариантов конфигурации ВПС выполняется процесс их верификации. Целью верификации полученных результатов является оценка вариантов и выбор наилучшего среди них. В случае если на каком-либо этапе генерации сформированный вариант оказывается работоспособным (отвечает условиям целевых функций), то он рассматривается как рабочий, и на его основе формируется команда на практическую реализацию в ПС.

Верификация является комплексной процедурой, в основе которой лежит имитационное моделирование процессов, протекающих в ВПС. На отдельных этапах имитационного моделирования осуществляется локальная оптимизация, с применением таких методов, как линейное программирование, динамическое программирование и т. д. Выбор конкретного метода зависит от типа текущей задачи. Имитационное моделирование

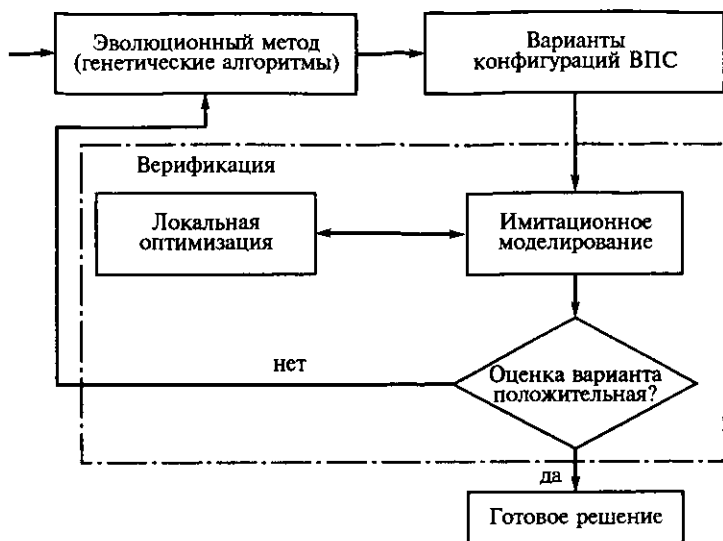


Рис. 10.1. Структурная модель процесса формирования конфигурации ВПС

позволяет вычлениить из общей задачи моделирования отдельные локальные, для решения которых могут быть применены указанные методы. Целью этого этапа является попытка нахождения в рамках сгенерированной текущей конфигурации ВПС наилучший вариант с точки зрения объемов используемых в ней производственных ресурсов при обеспечении заданных условий.

Если наилучший полученный вариант конфигурации не соответствует заданным условиям, происходит ранжирование сгенерированной популяции. На основе ранжированной популяции осуществляется формирование новой популяции и далее процесс повторяется до получения рабочего варианта.

10.2. Информационное обеспечение автоматизированного технологического проектирования

Информационное обеспечение технологического проектирования включает в себя информацию по всему комплексу вопросов технологического проектирования в условиях распределенных технологических систем. Состав информационного обеспечения определяется следующими составными частями:

- технологическая информация для БД;

- структура и состав БД для проектирования ТП;
- взаимосвязь БД и БЗ.

Для хранения информации в памяти ЭВМ необходима организация БД и БЗ. В настоящее время наиболее эффективной формой их построения является построение на базе реляционных отношений. Реляционная БД представляет собой взаимосвязанную совокупность таблиц, связанных отношениями. Таблицы содержат всю информацию, которая должна храниться в реляционной БД. Взаимосвязь отношений в БД определяется наличием общих атрибутов.

Разделение данных (полей) по таблицам, в которых они будут ассоциированы только с полями, относящимися к конкретной теме. Термин «реляционная база данных» относится именно к такой БД, содержащей множество таблиц, причем каждая посвящена конкретному предмету или теме.

Существует три основные модели реляционных БД:

- один к одному;
- один ко многим;
- многие ко многим.

Модель «один к одному» означает взаимно-однозначное соответствие и создается в том случае, если оба связываемых поля являются ключевыми полями или уникальными индексами (ключами). Связь один к одному предполагает, что каждая запись таблицы *A* соответствует единственной записи таблицы *B*, и наоборот. Связь этого типа используется редко. Как правило, большая часть информации, связанной подобным образом, должна находиться в одной таблице. Однако по соображениям безопасности можно применить связь один к одному, чтобы разнести информацию по двум таблицам. Например, поля с информацией, которая должна быть защищена от случайной модификации пользователем этого БД и который должен в силу специфики своей работы модифицировать другие поля, могут быть выделены в виде отдельной, защищенной таблицы.

Модель «один ко многим» предусматривает связь записи таблицы *A* с множеством записей в таблице *B*, но в ней только одна запись соответствует записи в таблице *A*. Модели такого типа используют достаточно часто. Она представляет собой связь, например, таблицы, содержащей параметры режущего инструмента и таблицу, содержащую данные о технологических операциях, в которых используется этот инструмент. Такая организация БД позволяет исключить избыточность информации, так как один и тот же инструмент может использоваться в различных операциях.

Более сложной моделью организации отношений является модель «многие ко многим». Характерной особенностью такой модели является наличие в ней двух связей «один ко многим» с третьей таблицей. При таком построении базы каждая запись в таблице *A* совпадает с множеством записей в таблице *B*, и наоборот. Связь такого типа возможна толь-

ко через связующую таблицу, при этом ее ключевое поле составляют из ключевых полей таблиц A и B .

При проектировании ТП необходимая информация извлекается из БД. Для этого осуществляется процедура поиска по заданному признаку (простому или составному ключу). Процедура поиска в процессе проектирования повторяется многократно и от эффективности способа ее реализации в значительной степени определяется время, затрачиваемое при получении необходимой информации.

При нерациональной организации процессов поиска происходят значительные затраты машинного времени и снижения производительности процессов проектирования. При количестве записей в БД, достигающих более сотен, процессы получения информации могут занимать весьма длительное время и тормозить проектирование ТП, что оказывается неприемлемым.

Поэтому процессам подготовки и работе с информацией уделяется большое внимание. Требуемое количество проверок при выборе нужной информационной записи из БД, содержащей массив из $x = \{1, 2, \dots, n\}$ элементов, составляет в среднем

$$n_{\text{пров}} = n/2 \quad (10.2)$$

проверок, а в наихудшем случае — n . Функция, описывающая число сравнений, является линейной, а сортировки, описываемые такой функцией, получили название линейных.

Для сокращения времени, затрачиваемого на поиск необходимой информационной записи, используют нелинейные методы, например дихотомический поиск. На рис. 10.2 представлен алгоритм дихотомического поиска требуемой информации, использование которого позволяет сократить среднее число проверок до величины

$$n_{\text{пров}} = \log_2(n) + 1. \quad (10.3)$$

Сравнивая выражения (10.2) и (10.3), видно, что время поиска в упорядоченном списке возрастает линейно от числа элементов массива n , тогда как использование метода дихотомического поиска сводит эту зависимость к экспоненциальной. Следовательно, эффективность метода дихотомического поиска существенно возрастает с увеличением размерности информационного массива.

Упорядочивание элементов массива (по возрастанию или убыванию значения ключа) требует использования процедуры сортировки. Сортировка — одна из наиболее часто выполняемых компьютерных операций, но и одна из самых продолжительных по времени. Целесообразность сортировки определяется сопоставлением преимуществ работы с упорядоченным массивом и затрат на упорядочение. Сортировка не обязательно

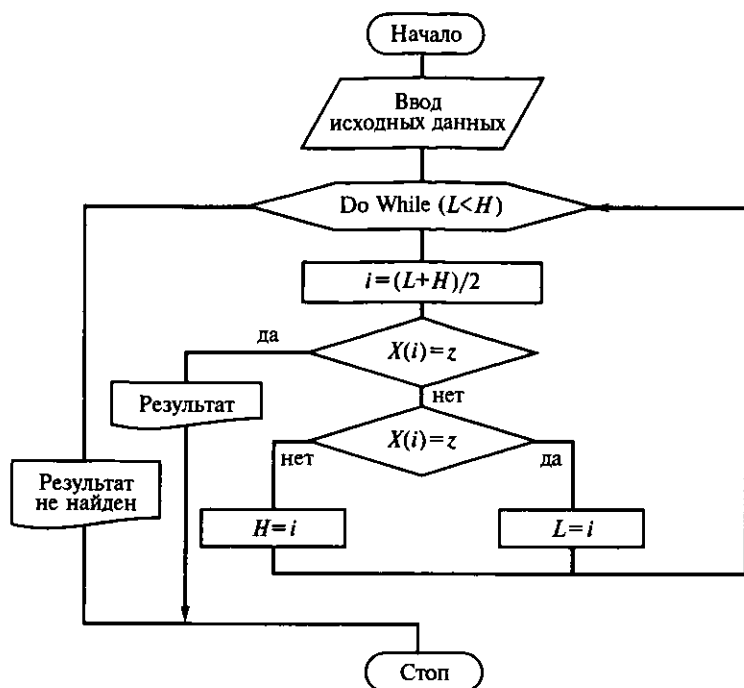


Рис. 10.2. Алгоритм дихотомического поиска требуемой информации

предполагает физическое упорядочение записей: можно ограничиться упорядочением ссылок на них.

Средняя трудоемкость операции сортировки неупорядоченных массивов

$$n_{\text{оп}} = n^2 / 2, \quad (10.4)$$

где $n_{\text{оп}}$ — количество шагов, производимых при сортировке массива.

В настоящее время существует большое количество алгоритмов проведения операций сортировки, однако нет алгоритма, одинаково хорошо подходящего для всех возможных ситуаций. Одним из характерных алгоритмов ускоренной сортировки больших неупорядоченных массивов является сортировка методом слияния. Предположим, что имеется неупорядоченный массив из m членов. Разделим его на k групп по n членов в каждой ($m = nk$). При этом возможны два случая:

- m/n — целое число. Количество сравнений (при использовании линейных методов сортировки) представляет сумму ряда $1, 2, \dots, n-1$, т. е.

$$L_1 = \frac{[1 + (n-1)](n-1)}{2} = \frac{n^2 - n}{2}. \quad (10.5)$$

• m/n — дробное число. Здесь возможны два варианта.

В первом варианте число групп равно $k+1$, т. е. k групп по n элементов и $k+1$ — остаток (n_1 элементов). Тогда количество сравнений L_1 при сортировке внутри каждой группы массива равно

$$L_1 = k \frac{n^2 - n}{2} + \frac{n_1^2 - n_1}{2}, \text{ где } n_1 < n. \quad (10.6)$$

Во втором варианте число групп равно k , где $k-1$ групп содержит по n элементов и k -я группа содержит $n + n_1$ элементов, где n_1 — остаток. Тогда количество сравнений L_1 при сортировке внутри каждой группы массива

$$L_1 = (k-1) \frac{n^2 - n}{2} + \frac{n_1^2 - n_1}{2}. \quad (10.7)$$

На первом этапе разбиения всего массива на группы выполняют следующие действия. Определяют число элементов в каждой группе: $n = m/k$. Если $kn = m$, то это первый случай, если нет — второй. Для первого варианта второго случая $k+1$ группа имеет $m-kn$ элементов, а для второго варианта k группа имеет $n+m-kn$ (n_1) элементов.

Число сравнений L_2 при слиянии всех групп массива представляет собой сумму членов ряда: $2n-1, 3n-1, 4n-1, \dots, kn-1$, таким образом: для первого случая

$$L_2 = \frac{(2n-1+kn-1)(k-1)}{2} = \frac{[n(2+k)-2](k-1)}{2}; \quad (10.8)$$

для первого варианта второго случая:

$$L_2 = \frac{[n(2+k)-2](k-1)}{2} + kn + n_1 - 1;$$

для второго варианта второго случая:

$$L_2 = \frac{[n(1+k)-2](k-2)}{2} + n(k-1) + n_1 - 1.$$

Следовательно, общее число сравнений $L_{\text{об}}$ при сортировке всего массива в целом составит для первого случая:

$$\begin{aligned} L_{\text{об}} &= \frac{k(n^2 - n)}{2} + \frac{(n(2+k)-2)(k-1)}{2} = \frac{kn^2 - kn + (2n + kn - 2)(k-1)}{2} = \\ &= \frac{kn^2 + k^2n - 2k - 2n + 2}{2}, \end{aligned}$$

или с учетом, что $n = \frac{m}{k}$,

$$L_{\infty} = \frac{\frac{m^2}{k} + km - 2k - 2\frac{m}{k} + 2}{2}. \quad (10.9)$$

Определим оптимальное значение числа групп, на которые следует разбивать массив. Для этого найдем экстремальное значение функции (10.9). Продифференцируем выражение, стоящее в числителе этой функции и результат приравняем нулю:

$$-m^2 k^{-2} + m - 2 + 2mk^{-2} = 0.$$

После преобразований получим

$$-m^2 + mk^2 - 2k^2 + 2m = 0.$$

Отсюда

$$k^2(m-2) = m^2 - 2m; \\ k = \sqrt{\frac{m^2 - 2m}{m-2}} = \sqrt{\frac{m-2}{1-\frac{2}{m}}} \approx \sqrt{m}. \quad (10.10)$$

Таким образом, выражение (10.10) позволяет определить оптимальное число групп, на которые следует разбивать весь массив в целом. Например, при числе членов массива, равного 120, число групп составит 10, а количество членов элементов в каждой группе составит 12. При сортировке всего массива в целом без разбиения ($m = 1, n = 120$) число сравнений составит, согласно (10.9), 7140, а при разбиении на оптимальное число групп ($m = 10, n = 12$) число сравнений составит 1299. Данный пример показывает ощутимый выигрыш по трудоемкости проведения сортировки методом слияния уже при числе членов всего массива уже порядка 100. Увеличение порядка числа членов массива выигрыш соответственно возрастает. В качестве недостатка приведенного метода следует отметить возрастание требуемого объема памяти компьютера для размещения массива при его сортировке.

Насыщение БД и БЗ необходимой информацией осуществляется на основе имеющейся информации о проектировании ТП, их построении и возможных вариантах, в зависимости от конкретных технологических условий, в которых они проходят. Большое разнообразие факторов, определяющих структуру ТП, определяют сложность процесса их проектирования.

База знаний представляет собой объединение данных и процедур их обработки. Она обладает следующими свойствами: интерпретируемостью, классификации, ситуативностью. Информация для БД формируется на основе научных положений и практических наработок в предметной области.

База данных содержит информацию о параметрах технологического оборудования, составляющего конкретную ПС, или возможного для приобретения. Эта информация является необходимой при поиске рационального или оптимального маршрута при выпуске продукции.

На рис. 10.3 представлена структура информационного обеспечения ММ, используемых для описания процессов, протекающих в ВПС. Все источники получения информационного обеспечения можно разделить на три основные группы: процесс обследования технологического оборудования, результаты имитационного моделирования взаимодействия группы технологического оборудования, результаты математического моделирования процессов обработки.



Рис. 10.3. Структура информационного обеспечения ММ

Получение необходимой информации можно обеспечить несколькими путями:

1. Использование специализированных контрольно-диагностических проверок (исследовательские работы с целью совершенствования конструкции, контрольные при постановке и в процессе производства, диагностические при производстве и эксплуатации) на базе ЭВМ, приборов целевого назначения с интерфейсными устройствами.

2. Накопление экспериментальных и статистических данных (входной контроль комплектующих изделий, узлов в процессе производства, выходной контроль, контроль состояния оборудования в процессе эксплуатации) на базе микропроцессорных устройств, дисплея и функциональной клавиатуры, энергонезависимой памяти, интерфейса для связи с цифровыми и аналоговыми измерительными приборами и с ЭВМ.

3. Моделирование процессов, протекающих непосредственно на технологическом оборудовании при выполнении спроектированных ТП.

Необходимую информацию получают в результате проведения обследования технологического оборудования в ПС. Обследование включает в себя процедуры хронометража, измерения и контроля параметров технологического оборудования, сбор статистического материала. Эта категория параметров относится к условно-постоянным, так как время их изменения достаточно большое (превышает время выполнения каждого из ПЗ). Эта информация необходима для формирования рынка услуг по предоставлению технологического оборудования РПС.

Часть информационного обеспечения нельзя получить путем прямых наблюдений. В этом случае необходимо осуществлять моделирование процессов, имеющих место в конкретных условиях производственной системы.

Отдельные единицы технологического оборудования, составляющие ПС, могут быть объединены в группу, и функционировать в виде участка или робототехнического комплекса. Такое объединение вносит свои коррективы при определении производительности и коэффициента загрузки технологического оборудования, в него входящего. Результат функционирования каждой единицы технологического оборудования оказывается взаимосвязанным с процессами функционирования других единиц технологического оборудования, входящего в это объединение.

Определение параметров функционирования каждой отдельной единицы технологического оборудования необходимо рассматривать в связи с другими единицами технологического оборудования, каждое из которых находится в своем текущем состоянии (простаивает, выполняет заданный технологический процесс и т. д.). Взаимовлияние параметров отдельных единиц технологического оборудования обусловлено наличием объединяющего элемента — работа, их обслуживающего.

При проведении реализации указанной имитационной модели с ис-

пользованием средств вычислительной техники может возникнуть необходимость в обеспечении ее параметрами непосредственно процесса обработки на станке. Наиболее сложным случаем обработки, с точки зрения получения параметров, является случай контурной обработки. Непредсказуемость геометрии обрабатываемого контура, требуемая коррекция при проведении обработки — все это приводит к необходимости проведения моделирования процесса обработки. Здесь необходимо отметить высокую сложность подобных ММ, которые в большинстве случаев должны реализовываться в реальном масштабе времени при обеспечении необходимой точности расчетов. Далее в главе рассмотрен вопрос создания такой модели.

Получение информации на основе описанных путей обеспечивает необходимую достоверность при максимальном исключении случайных факторов. Такое исключение обеспечивается прежде всего максимальной автоматизацией всех процессов как связанных с подготовкой производства, так и при непосредственном функционировании технологического оборудования.

Важным оказывается этап подготовки производства, связанный с переналадкой технологического оборудования. Наличие требуемой технологической оснастки для проведения конкретного ТП, возможность быстрого изменения состава оснастки (возможно лишь изменение ее части при сохранении базового конструктива) и максимально простой процедуры ее настройки (возможно в автоматическом режиме) является важным условием предсказуемости и возможности оперативного определения параметров процессов переналадки. В свою очередь, наличие достоверной информации о параметрах производственных процессов обеспечивает необходимую достоверность результатов моделирования функционирования ВПС. Уменьшению вероятности появления случайных факторов, снижающих достоверность информационного обеспечения, служит внедрение в производство автоматизированного оборудования.

10.3. Методическое обеспечение многообъектного технологического проектирования

При проектировании ТП на выполнение ПЗ необходимо сформировать комплекты технологических операций, требуемых для их выполнения. В связи с тем что процесс формирования ВПС определяется составом ТП, при их проектировании следует получить все возможные варианты. Для этого массив технологических операций, составляющих ТП, должен иметь их полный набор.

Исходными данными для построения маршрутов служат конструк-

тивные особенности детали, технические условия приемки, программа выпуска, а также заданный вид заготовки. Деталь относят к типовому классу (валы, диски, корпусные детали и др.), руководствуясь принятым классификатором. В зависимости от условий данную конкретную деталь относят к группе, подгруппе или типу в соответствии с построением используемой классификации.

На рис. 10.4 представлена схема процесса синтеза маршрута обработки исходя из конкретных конструктивных признаков изготавливаемой детали и состава ОПС. Такое построение позволяет учитывать различные случаи, которые могут возникнуть при формировании маршрута обработки.

В простейшем случае информация о детали может предусматривать наличие одного-единственного варианта ТП (обычно для деталей простой конструкции). Тогда формируется одновариантный ТП. В более сложных случаях необходимо формировать совокупность вариантов ТП. При этом используют подходы, основанные на формировании обобщенного маршрута, базовых конструктивах с конструктивными обогащениями и моделях эксперта.

Формирование обобщенного маршрута осуществляется для типовых деталей, которые могут входить в состав ПЗ. Для этого формируется ряд классов (групп, подгрупп или типов) деталей и для каждого из них разрабатывается обобщенный маршрут обработки. Обобщенный маршрут включает перечень операций обработки, характерный для определенного класса деталей. Этот перечень является упорядоченным и представляет множество операций существующих индивидуальных маршрутов. Маршруты имеют типовую последовательность и содержание, причем на уровне предприятия учитываются его опыт и традиции, а также научно-технические достижения и перспективы развития отрасли.

Если имеется множество индивидуальных маршрутов $M_1, M_2, \dots, M_p, \dots, M_r, \dots, M_n$ (в индексе указаны номера индивидуальных маршрутов) для какого-то класса или группы деталей, то при объединении этих маршрутов в обобщенный $M_y^* \supset M_i$, т. е. обобщенный маршрут M_y^* включает индивидуальные M_i . Причем число объединенных маршрутов должно стремиться к максимуму, т. е. $M_y^* \bigcup_{i=1}^n M_i$, где $n \rightarrow \max$. Объединение маршрутов характеризует область пересечения множества при вхождении в обобщенный маршрут. Необходимым условием включения индивидуального маршрута в обобщенный является наличие области пересечения, например M_i и M_j , как непустого множества:

$$M_i \cap M_j \neq \emptyset. \quad (10.11)$$

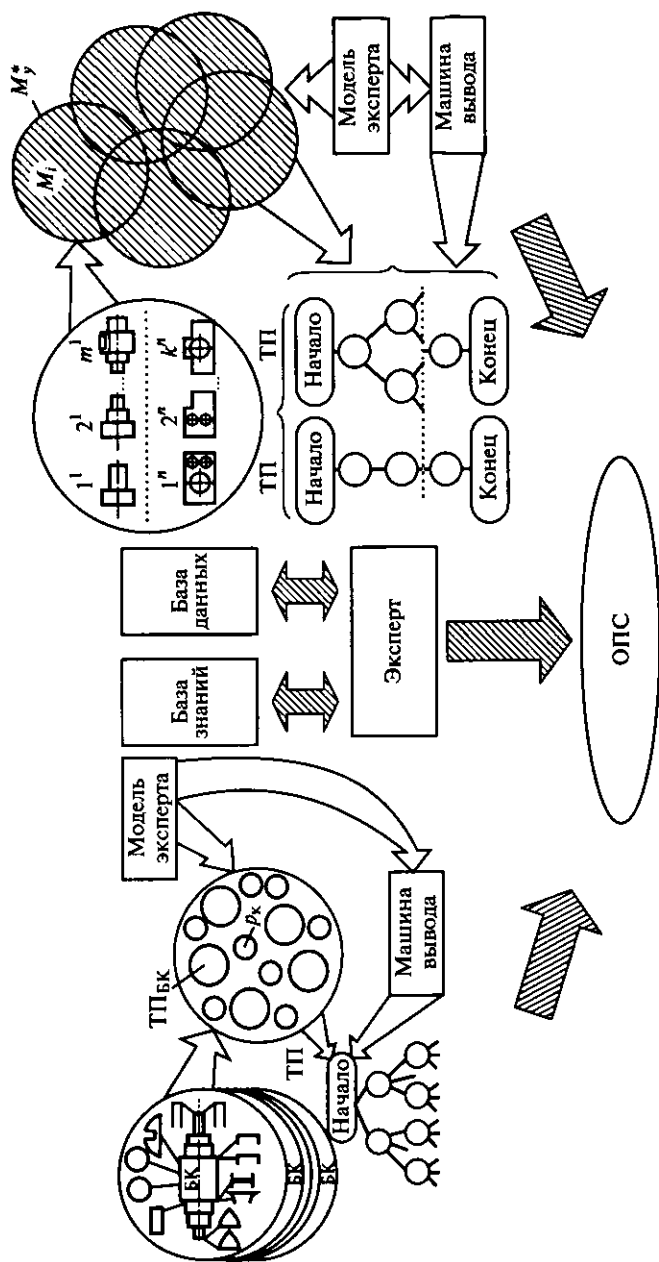


Рис. 10.4. Синтез структуры ТП при формировании ВПС

В этом случае

$$(M_i \vee M_j) \subset M_{ji}^*, \quad (10.12)$$

т. е. первый или второй маршруты могут входить только отдельно.

Если

$$(M_i \wedge M_j) \subset M_{ji}^*, \quad (10.13)$$

то оба маршрута обязательно должны входить в обобщенный маршрут.

Когда отсутствует область пересечения

$$M_i \cap M_j = 0, \quad (10.14)$$

это означает, что эти маршруты не могут входить в один и тот же обобщенный маршрут.

Важной характеристикой (критерием эффективности) формирования области пересечения обобщенного маршрута является мощность пересечения множеств индивидуальных маршрутов $|M_{\text{пер}}|$, т. е. количество одинаковых операций, входящих в это пересечение:

$$|M_{\text{пер}}^*| = \bigcap_{i=1}^n M_i \quad (i = 1, 2, \dots, n); \quad |M_{\text{пер}}| \rightarrow \max. \quad (10.15)$$

Мощность пересечения в обобщенном маршруте должна стремиться к максимуму, что является основным условием объединения нескольких индивидуальных маршрутов в обобщенный. Тогда мощность обобщенного маршрута

$$|M_{\text{пер}}^*| = \bigcup_{i=1}^n M_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10.16)$$

должна стремиться к минимуму $|M_{\text{пер}}^*| \rightarrow \min$.

Следовательно, обобщенный маршрут представляет собой множество пересекающихся множеств индивидуальных маршрутов. В пересечение при объединении двух или нескольких маршрутов входят эквивалентные (одинаковые) операции. Эти операции должны иметь один и тот же код операции. Мощности $M_{\text{пер}}$ и $M_{\text{пер}}^*$ могут служить критериями для анализа и совершенствования работ по типизации ТП, т. е. количество эквивалентных операций для различных деталей одной группы (класса) позволяет оценить возможность объединения деталей в группу и достаточность уровня проведенных работ по типизации на предприятии.

С целью обеспечения единого цикла «проектирование — изготовление» широкого спектра сложности изготавливаемых деталей предлагается подход, в основе которого лежит принцип группирования по базовым (типовым) конструктивам BK_n , изготавливаемого комплекта деталей и конструктивным обогащениям (отдельные конструктивные элементы). Та-

ким образом, ТП для изготовления комплекта деталей можно представить как совокупность операций обработки базовых конструктивов $ТП_6$, и переходов P_k на обработку элементов конструктивного обогащения $M=\{ТП_6, P_k\}$. Такой подход позволяет перейти к блочно-модульному принципу проектирования ТП и подготовки УП для станков с ЧПУ. Модель эксперта включает правила, учитывающие соотношение конструктивных признаков базового типового образа (конструктива) и конструктивных элементов обогащения, что определяет проектирование типового или единичного ТП. Синтез ТП происходит при выделении его из обобщенной структуры или проектируется единичный технологический процесс. Машина вывода в обоих случаях позволяет иметь альтернативные варианты, позволяющие учитывать изменяющиеся производственные условия.

Достоинством разработки ТП с помощью базовых конструктивов и конструктивного обогащения является прежде всего то, что они позволяют существенно упростить *единичный, сквозной цикл* «проектирование — изготовление» детали. Для таких средств проектирования могут существовать библиотеки операционных карт и определенные наборы групповых карт наладки оборудования. Последнее обеспечивает групповые способы производства спроектированных деталей.

Если учесть, что этап преобразования конструкторского описания детали в ее конструктивно-технологическое описание в едином цикле «разработка — изготовление» для первых двух способов неизбежен, то третий способ описания детали конструктором эффективен для единого цикла. Такой подход позволяет проектировать ТП последовательности обработки макроэлементов в соответствии с их спецификой. При этом образуется единый, сквозной цикл «проектирование — изготовление» деталей произвольной конфигурации при существенном сокращении времени на технологическую подготовку производства.

После получения массивов данных о технологических операциях, выполнение которых в том или ином составе и последовательности обеспечивает выполнение ПЗ, необходимо формирование окончательных маршрутов их выполнения и последовательности запуска в ВПС. Эта задача является сложной ввиду высокой вычислительной мощности вследствие высокой размерности. Как показывают исследования, при решении подобных задач следует использовать методы эволюционного поиска рационального решения.

Одним из таких методов является метод на основе использования генетических алгоритмов. Согласно методу генетических алгоритмов, возможные решения представляются в виде набора хромосом (популяция). Процесс формирования хромосом может осуществляться двумя способами. При первом способе в качестве генов используются непосредственно проектируемые параметры. Тогда каждому локусу соответствует одна

технологическая операция, а генами являются операции из маршрута выполнения ПЗ. Значением i -го гена будет технологическая операция, выполняемая i -й в маршруте обработки. При втором способе генами являются не параметры ТП (проектируемые параметры), а номера эвристик, используемых для определения последовательности технологического маршрута.

Такой подход получил название метод комбинирования эвристик. Этот метод предполагает поиск последовательности эвристик, обеспечивающей оптимальный вариант технологических маршрутов и их состав. При использовании указанного метода число требующихся генов в хромосоме в два раза меньше, чем при первом способе. Если число используемых эвристик равно K , то мощность множества возможных хромосом составляет

$$W = K^N, \quad (10.15)$$

где N — число наименований деталей, составляющих ПЗ.

Для организации алгоритма поиска рабочего варианта распределения ТП в ВПС введем следующие ограничения целевой функции:

- задействовать минимальное число слоев ОПС, так как в этом случае сокращается объем транспортных расходов, уменьшается количество договоров и производственных связей;
- выполнить заданные сроки, так как срыв сроков недопустим;
- обеспечить минимальную себестоимость.

Для решения поставленной задачи используются следующие эвристики.

Эвристики для выбора очередной технологической операции:

- 1) выбирается ПЗ с наиболее «коротким» сроком;
- 2) выбирается ПЗ, требующее использование нетипичных видов обработки (например, размерная: электрохимическая, лазерная и т.д.);
- 3) выбирается ПЗ с наименьшим временем окончания обслуживания на предыдущей стадии;
- 4) выбирается ПЗ с наименьшей длительностью выполнения очередной операции;
- 5) выбирается ПЗ с наибольшей длительностью выполнения очередной операции;
- 6) выбирается ПЗ с аналогичной выполняемой операцией на данном виде технологического оборудования.

Эвристики для выбора ПС:

- 1) выбирается ПС, в которой есть возможность выполнения необходимых специфических технологических операций (размерная обработка: лазерная, химическая, электроэрозионная и т.д.);
- 2) выбирается ПС, в которой есть возможность осуществления всего необходимого набора технологических операций;

3) выбирается ПС, в которой выполнение ПЗ будет иметь минимальную себестоимость;

4) выбирается ПС, в которой выполнение очередной операции ПЗ закончится раньше, чем в других;

5) выбирается ПС, в которой время выполнения очередной операции минимально.

Полученные две группы эвристик обозначим соответственно символами A и B . Тогда каждую эвристику первой группы обозначим как $A1, \dots, A2, \dots, A6$, а каждую эвристику второй группы обозначим как $B1, B2, \dots, B5$. Используя разработанные эвристики в их обозначениях, сформируем комбинации из 30 возможных вариантов:

$E1 = (A1, B1)$	$E2 = (A1, B2)$	$E3 = (A1, B3)$	$E4 = (A1, B4)$	$E5 = (A1, B5)$
$E6 = (A2, B1)$	$E7 = (A2, B2)$	$E8 = (A2, B3)$	$E9 = (A2, B4)$	$E10 = (A2, B5)$
$E11 = (A3, B1)$	$E12 = (A3, B2)$	$E13 = (A3, B3)$	$E14 = (A3, B4)$	$E15 = (A3, B5)$
$E16 = (A4, B1)$	$E17 = (A4, B2)$	$E18 = (A4, B3)$	$E19 = (A4, B4)$	$E20 = (A4, B5)$
$E21 = (A5, B1)$	$E22 = (A5, B2)$	$E23 = (A5, B3)$	$E24 = (A5, B4)$	$E25 = (A5, B5)$
$E26 = (A6, B1)$	$E27 = (A6, B2)$	$E28 = (A6, B3)$	$E29 = (A6, B4)$	$E30 = (A6, B5)$

Использование метода комбинирования эвристик предусматривает формирование популяции хромосом, состоящей из генов — аналогов каждой из перечисленных выше комбинаций эвристик. Размер каждой хромосомы определяется числом задействованных единиц технологического оборудования в ВПС. Размер популяции определяется количеством ПЗ. Структура популяции на некотором промежуточном этапе имеет следующий вид:

	1	2	3	...	$m-1$	m
1	$E3$	$E8$	$E20$	...	$E4$	$E5$
2	$E18$	$E23$	$E29$	...	$E30$	$E23$
...	...	...	...	...	...	...
n	$E26$	$E22$	$E13$	...	$E9$	$E20$

На основании анализа эволюции хромосом от популяции к популяции производится модификация конфигурации ВПС. Если в результате эволюции формируется рабочий вариант, удовлетворяющий целевой фун-

кции, то осуществляется попытка исключения из состава ВПС технологического оборудования, или даже целой РПС, использованию которой соответствуют эвристики, минимально повторяющиеся в последовательности генов хромосомы.

В случае если в результате эволюционных преобразований не удается получить работоспособный вариант, в состав формируемой ВПС вводят дополнительные единицы технологического оборудования используемых РПС, или элементы других, не используемых до этого частей РПС, но которые отвечают эвристикам, максимально часто встречающимся в последовательности генов хромосомы.

10.4. Интеллектуальное управление процессами технологического проектирования

Интеллектуализация процессов управления предусматривает формирование командной информации на основе системы понятий прикладной области, использовании знаний в естественном виде, без привлечения программистов. Реализация концепции интеллектуализации опирается на развитые методы работы со знаниями: их представление, хранение, использование и т. д. При этом под знаниями понимают систему понятий прикладной области, а также связь с их представлениями в формальной модели; структуру данных информационной модели прикладной области; ММ, используемые при проектировании; правила принятия решений. Интеллектуальной системе достаточно задать постановку задачи в виде требуемого результата и условий его получения. Последовательность операций, необходимых для получения результата, определяется системой автоматически.

Решение вопроса управления процессом функционирования ВПС связано с формированием управляющей информации на основе принятия решений по выбору оптимальной стратегии при изменении ее конфигурации. Принятие решений осуществляется на основе анализа текущей производственной ситуации.

На рис. 10.5 представлен характер изменения состояния ВПС во времени и формируемого вектора управления. Управление осуществляется исходя из минимизации используемых ресурсов ОПС и требованиям к срокам выполнения тех или иных этапов производственного процесса.

Управление процессом функционирования ВПС осуществляется по двум основным направлениям:

- 1) изменение последовательности загрузки технологического оборудования;
- 2) изменение объемов используемых ресурсов ВПС.

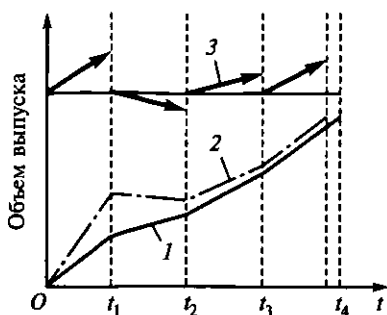


Рис. 10.5. Изменение состояния ВПС во времени:

1 — объем выпуска ПЗ; 2 — объем заданного выпуска; 3 — вектор управления ресурсами ВПС

Первое направление предусматривает изменение сроков запуска ПЗ на выполнение, изменение маршрута прохождения ПЗ по отдельным рабочим местам ВПС. Изменение последовательности загрузки технологического оборудования связано с изменением маршрутов обработки и (или) сроков запуска ПЗ на выполнение.

Основная исходная информация для решения задачи включает размер партии, рабочий чертеж и технические требования, чертеж заготовки, сведения о наличном оборудовании, базовые поверхности заготовок и их способы установки, данные по инструменту. Все эти данные составляют информационное обеспечение системы управления. Блок управления служит для разработки общего плана механической обработки детали и передачи решения на определенный блок формирования операций обработки поверхностей. В его основе заложен массив последовательности выполнения операций обработки различных поверхностей в зависимости от типа детали и наличия термической обработки. Блоки формирования операций обработки основных и не основных поверхностей могут быть разработаны с различной степенью детализации в зависимости от типа производства. При детальной разработке блоков формирования операций необходимо учитывать многовариантность решений.

Система состоит из комплекса компьютеризированных подсистем, включающих конструкторское, технологическое проектирование, технологическую подготовку производства, а также подсистему управления и синхронизации этапов их функционирования. Она обеспечивает реализацию принципа сквозного автоматизированного цикла от конструирования до изготовления изделий, что принципиально повышает эффективность использования ПС. Обеспечение высокой эффективности достигается за счет повышения производительности изготовления готовых изделий, существенного снижения времени выполнения ПЗ (уменьшение времени от момента его поступления до момента выхода готовой продукции), снижение себестоимости готовой продукции.

В основе подсистемы конструкторской подготовки производства лежит разработанная структура оболочки автоматизированных классифи-

каторов на основе классификации кодирования конструктивных и технологических признаков деталей, изготавливаемых в условиях экспериментального машиностроения.

Полученные результаты позволяют легко формализовать информацию об изготавливаемых деталях, автоматизировать проектирование ТП и проводить их многовариантную оценку с целью получения оптимального технологического процесса.

Автоматизированное построение оптимальных операций позволяет формировать типовые технологические решения, с помощью которых можно компоновать ТП обработки. В результате многовариантного проектирования каждой операции формируется граф возможных вариантов ТП обработки детали. При составлении последовательности операций следует учитывать расстановку оборудования в цехе (при проектировании маршрута для действующего производства) для исключения обратных движений деталей по станкам.

Построение станочных операций предусматривает определение содержания переходов, их последовательность и возможность совмещения переходов во времени. С учетом этого определяют промежуточные допуски, режимы резания и норму времени. Возможные варианты оценивают по производительности и себестоимости, при этом сохраняется технико-экономический принцип проектирования. Построение отдельных операций с использованием ЭВМ позволяет иметь типовые технологические решения, с помощью которых можно компоновать технологический процесс обработки.

При построении любой станочной операции ММ представляется в виде совокупности формул, уравнений, неравенств, отображающих закономерности, присущие реальному ТП. Отличие может быть в специфике операции, целевой функции (например, максимальная производительность, технологическая себестоимость и др.) и применяемых математических методов (регулярный поиск, направленный поиск, симплекс-метод и др.).

Закономерности, присущие станочной операции, могут быть описаны рядом количественных связей между параметрами, характеризующими точность, производительность, экономичность механической обработки, и факторами, влияющими на их величины. Закономерности станочной операции ограничивают область допустимых вариантов механической обработки деталей и определяют критерий выбора оптимального варианта из всех возможных.

Большое значение приобретает разработка методов структурного и параметрического синтеза гибких производств, способствующих обеспечению оптимальности принимаемых решений и получению существенного экономического эффекта. Все этапы синтеза в конечном итоге преследуют цель достижения экстремума целевой функции оптимизации.

Формирование типовых образов и фрагментов обогащений прежде всего предполагает учет данных, приходящих с технологического уровня и конкретизирующих информацию об элементах деталей на основе общности рабочего места, оснастки, режущего инструмента, материала. Это обеспечивает оперативную связь при интерактивном взаимодействии конструктора и технолога на базе вычислительной системы. Такой подход позволяет обеспечить повышение производительности труда как технолога, так и конструктора за счет комплексного внедрения компьютерного интегрированного производства.

При проектировании ТП важно, чтобы максимальное количество технологических операций выполнялось на однотипном технологическом оборудовании. Это означает, что обобщенная структура M_y , состоящая из типовых индивидуальных маршрутов M_i , будет представлять собой

$$M_y = \bigcup_{i=1}^n M_i \text{ и } M_i \subset M_y. \quad (10.16)$$

Необходимым условием включения индивидуального маршрута в обобщенный является наличие области пересечения. Мощность пересечения множества операций в обобщенном маршруте увеличивается при использовании однотипного оборудования, при этом мощность обобщенной структуры M_y уменьшается. Также учитываются условия назначения операции (перехода) в маршруте.

Целевая функция, лежащая в основе модели формирования процесса загрузки технологического оборудования, имеет вид

$$Q = q(x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n C_j X_j, \quad (10.17)$$

где Q — суммарная себестоимость ТП, исходя из загрузки оборудования производственной системы; C_j — себестоимость j -го производственного процесса; X_j — параметры j -го производственного процесса.

Технологические операции обработки отдельных элементов группируются исходя из загрузки имеющегося технологического оборудования. При этом за основу берется наиболее часто используемое оборудование, на котором, в рамках фонда свободного времени, выполняются операции, не являющиеся типовыми для него. Таким образом, оказалось возможным решить две основные задачи оптимизации структуры ВПС: повысить производительность и снизить себестоимость изготавливаемых деталей.

Изменение объема производственных ресурсов, задействованных в текущей конфигурации ВПС, осуществляется по результатам моделирования хода выполнения ТП в ВПС с анализом прогнозируемых сроков их выполнения. При получении отрицательного результата проводится анализ возможных вариантов исправления ситуации в желательном направ-

лении. Если использование этого пути не обеспечивает выполнения сроков, принимается решение по изменению конфигурации ВПС. Конфигурация ВПС изменяется путем проведения всего комплекса описанных выше процедур по нахождению лучшего варианта конфигурации ВПС. В этом случае за основу начального варианта конфигурации ВПС принимается последняя версия рабочего варианта.

Анализ и принятие решения осуществляются при возникновении изменений в текущей производственной ситуации. Такими причинами могут быть:

- 1) поступление новых ПЗ;
- 2) отказ отдельных производственных систем от выполнения запланированных работ;
- 3) отказ по техническим причинам отдельных единиц технологического оборудования;
- 4) отклонение реальных сроков выполнения заданных ПЗ от расчетных на недопустимую величину.

Использование такого подхода обеспечивает оперативную реакцию системы управления изменением конфигурации ВПС на изменение текущей производственной ситуации.

10.5. Примеры реализации многообъектного автоматизированного технологического проектирования в виртуальной производственной системе

Одним из основных агрегатов грузового автомобиля является коробка передач. В нашей стране создан ряд модульных конструкций коробок передач широкого диапазона. Все детали коробок передач разделены на модули, представляющие собой группы деталей, объединенных по конструктивным и технологическим признакам, выполняющие одни и те же функции.

Первым классификационным признаком является назначение узла коробки передач, в которую входит деталь. К первому модулю отнесены корпусные детали, ко второму — детали, определяющие передаточное отношение, далее детали узлов синхронизации переключения передач, детали различных механизмов управления, присоединительные детали для передачи крутящего момента, нормали и комплектующие изделия.

Каждый модуль деталей отличается своим ТП и определенным набором оборудования, оснастки и инструмента. Построение модульного ТП коробок передач включало в себя следующие основные этапы: классификацию деталей на модули, анализ деталей в каждом модуле на технологичность с учетом максимальной унификации отдельных поверхностей деталей, формирование маршрута обработки, проектирование операций.

Критерием выбора маршрута обработки явилось обеспечение требуемой производительности обработки при условии минимизации используемых производственных ресурсов.

Разработанные методики использовались на этапе технологической подготовки производства двух модификаций коробок передач — 9КП и 5КП. Эскизы конструкций указанных коробок передач приведены соответственно на рис. 10.6 и 10.7.

Технологические маршруты обработки разрабатывались на основе обобщенного маршрута. Обобщенный маршрут формировался на основе совокупности заданных технологических операций обработки отдельных конструктивных элементов корпусных деталей. Перечень операций приведен в табл. 10.1 (для коробки передач 9КП) и 10.2 (для коробки передач 5КП).

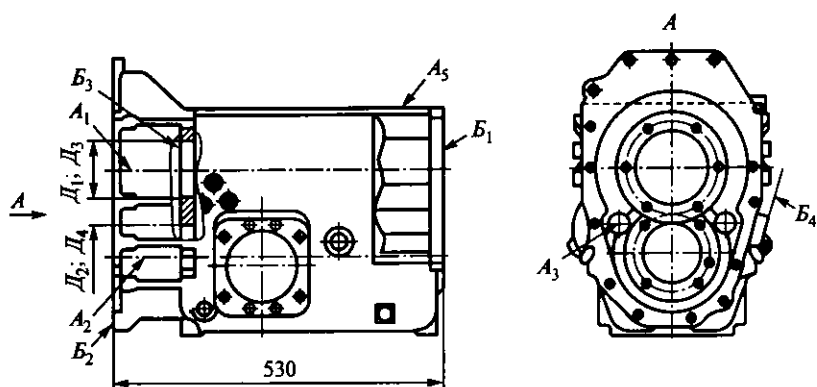


Рис. 10.6. Эскиз конструкции коробки передач КП9

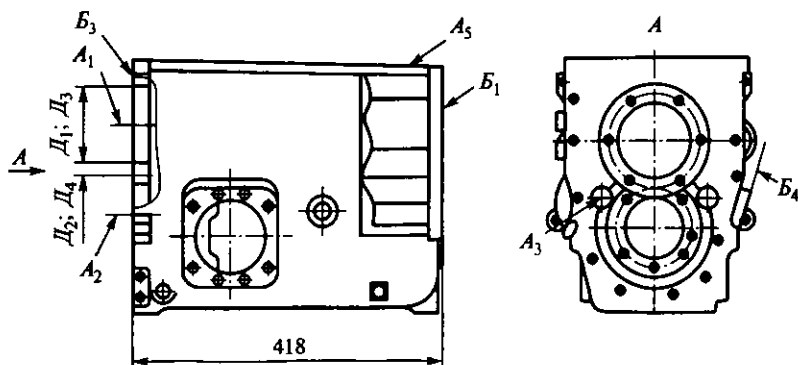


Рис. 10.7. Эскиз конструкции коробки передач КП5

На основе обобщенного маршрута были выделены два маршрута, имеющие максимально схожие структуры. Использование разработанных методик позволило определить рациональные потоки движения заго-

Таблица 10.1

Технологический процесс обработки картера 9КП

Технологическое оборудование	Группа технологического оборудования	Технологическая операция
ОТ ₁	Блок А ₁	Фрезерование технологических баз (пластиков) для передвижения картера по АЛ
ОТ ₂		Черновое фрезерование торцовых поверхностей картера Б ₁ и Б ₂ в размер 533, поверхностей Б ₄ , А ₅ и проушин под ось заднего хода в размер 34,8
ОТ ₃		Обработка технологических базовых отверстий
ОТ ₄	Блок Б	Чистовое фрезерование плоскости А ₅
ОТ ₅		Обработка бобышек на боковых поверхностях картера
ОТ ₆		Обработка люка отбора мощности
ОТ ₇		Обработка отверстий на плоскости А ₅
ОТ ₈	Блок В	Черновая расточка отверстий Д ₁ —Д ₄
ОТ ₉		Подрезка торцов вокруг отверстий Д ₁ и Д ₂
ОТ ₁₀		Обработка отверстий на плоскости Б ₁ базовых отверстий на плоскости Б ₂ и сверление отверстий под ось заднего хода
ОТ ₁₁		Получистовое и чистовое фрезерование поверхностей Б ₁ и Б ₂
ОТ ₁₂	Блок Г	Чистовое фрезерование плоскости Б ₃
ОТ ₁₃		Обработка отверстий под ось заднего хода и растачивание базовых отверстий на плоскости Б ₂
ОТ ₁₄		Чистовая расточка отверстий Д ₁ —Д ₄ совместно с отверстием под ось заднего хода
ОТ ₁₅	Блок Д	Обработка отверстий на плоскости Б ₁ , Б ₂ и Б ₃
ОТ ₁₆		Раскатка отверстий Д ₁ —Д ₄
ОТ ₁₇		Чистовое фрезерование плоскости Б ₄

Технологический процесс обработки картера 5КП

Технологическое оборудование	Группа технологического оборудования	Технологическая операция
ОТ ₁	Блок А ₂	Фрезерование технологических баз (платиков) для передвижения картера по АЛ
ОТ ₂		Черновое фрезерование торцовых поверхностей картера Б ₁ и Б ₂ в размер 421, поверхностей Б ₄ , А ₅ и проушин под ось заднего хода в размер 78
ОТ ₃		Обработка технологических базовых отверстий
ОТ ₄	Блок Б	Чистовое фрезерование плоскости А ₅
ОТ ₅		Обработка бобышек на боковых поверхностях картера
ОТ ₇		Обработка отверстий на плоскости А ₅
ОТ ₈	Блок В	Черновая расточка отверстий Д ₁ —Д ₄
ОТ ₉		Подрезка торцов вокруг отверстий Д ₁ и Д ₂
ОТ ₁₁		Получистовое и чистовое фрезерование поверхностей Б ₁
ОТ ₁₂	ГПС	Окончательное фрезерование плоскости Б ₁ , Б ₃ и обработка отверстий на этих поверхностях. Окончательная расточка и раскатка отверстий Д ₁ —Д ₄
ОТ ₁₃		Обработка отверстия под ось заднего хода
ОТ ₁₄		Обработка люка отбора мощности
ОТ ₁₅		Чистовое фрезерование проушин под ось заднего хода

готовок при их обработке, исходя из возможности совмещения максимального числа операций для выполнения их на одном и том же технологическом оборудовании при минимальной переналадке.

Из имеющегося набора технологического оборудования были сформированы две структуры АЛ, которые могли обеспечивать выполнение всех технологических операций, необходимых для получения готовых деталей. Формирование структур осуществлялось с применением разработанных методик. Их применение позволило определить рациональную последовательность прохождения заготовок через отдельные рабочие места и выявить части, которые могли быть совмещены исходя из состава

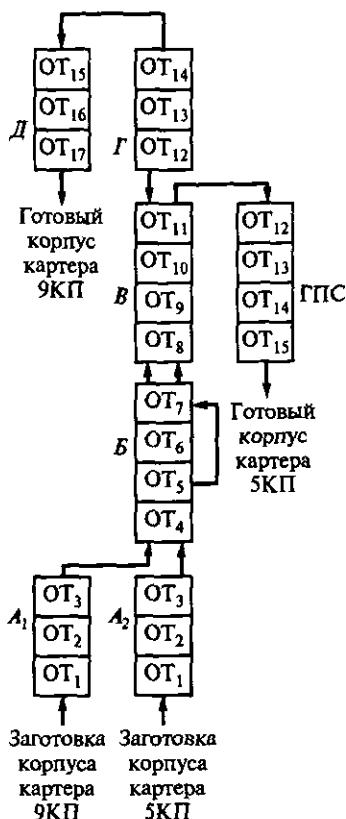


Рис. 10.8. Структура автоматической линии для обработки картеров 9КП и 5КП

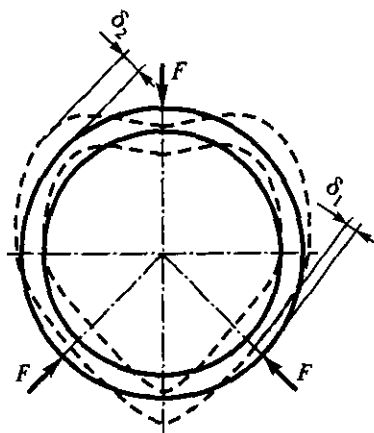


Рис. 10.9. Деформация тонкостенного кольца при его закреплении

и последовательности выполнения технологических операций и их длительности выполнения.

На основе полученных результатов была окончательно скомпонована структура автоматических линий (рис. 10.8), наилучшим образом отвечающая требованиям минимизации использованных производственных ресурсов при обеспечении заданного объема выпуска изделий. Скомпонованная АЛ имеет два входа запуска заготовок корпусов картера: первый — для коробок пере-

дач 5КП и второй для коробок передач 9КП.

Наличие двух выходов АЛ, с которых выходят готовые детали, обусловлены различиями технологических маршрутов изготовления каждого из видов коробок передач. Одинаковые элементы АЛ, расположенные на входах, необходимы для обеспечения заданного значения такта на каждой единице технологического оборудования, составляющего АЛ.

Основным условием реализации перспективной технологии в ГПС и автоматических переналаживаемых линиях является выбор оптимального варианта ТП под заданную номенклатуру деталей. Необходимым условием при этом являются групповые модульные технологии и технологические операции, обеспечивающие обработку рассматриваемых деталей. В данном случае базовым маршрутом является ТП обработки 9-

ступенчатого картера на линии 1Л488. Для обработки картера 5-ступенчатой коробки передач потребовалось дополнительное введение автоматической линии А₂, состоящей из трех специальных станков и двух станков линии ГПС. В связи с модульностью конструкции все остальные операции выполняются на АЛ Б и В без дополнительной переналадки.

С целью исключения субъективного фактора повышение производительности обработки и снижения трудоемкости переналадки технологического оборудования необходимо использовать оснастку, инвариантную к изменяющимся параметрам обрабатываемых заготовок. Кроме того, такая оснастка должна быть автоматизированной. В качестве примеров рассмотрим часто встречающиеся случаи при различных видах обработки.

При токарной обработке тонкостенных заготовок возникают погрешности формы и размеров в результате закрепления заготовки в патроне станка. Закрепление тонкостенной заготовки в трехкулачковом патроне по наружной поверхности в местах приложения зажимного усилия F (под кулачками) вызывает прогиб кольца δ_1 , а между кулачками — его выпучивание δ_2 (рис. 10.9).

Величины δ_1 и δ_2 можно определить по следующим формулам:

$$\delta_1 = 0,016 \frac{FR_{\text{cp}}^3}{EJ}; \quad (10.18)$$

$$\delta_2 = -0,014 \frac{FR_{\text{cp}}^3}{EJ}. \quad (10.18)$$

Здесь F — усилие зажима, Н; R_{cp} — средний радиус, мм; E — модуль упругости материала кольца (для стали $E = 2,10^4$ Н/мм²); J — момент инерции поперечного сечения кольца относительно нейтральной оси, мм⁴, для прямоугольного сечения:

$$J = \frac{bh^3}{12},$$

где b — ширина кольца, мм; h — толщина кольца в поперечном сечении, мм.

Расчетная величина погрешности формы

$$\Delta_{\phi} = 2(|\delta_1| + |\delta_2|). \quad (10.19)$$

Для ликвидации причин, вызывающих указанные погрешности, возможно применение автоматического устройства, позволяющего избежать деформации заготовки при ее закреплении. На рис. 10.10 представлена схема устройства крепления тонкостенных цилиндрических заготовок. Оно состоит из металлической части и электронного блока, позволяющего осуществить функционирование в автоматическом режиме. Устрой-

ство обеспечивает повышение точности за счет уменьшения деформации колец при закреплении и обеспечение возможности регулирования усилия зажима. Крепление осуществляется с помощью трех пар кулачков, расположенных попарно в радиальных пазах корпуса устройства для закрепления тонкостенных колец, причем три внешних кулачка играют роль самоустанавливающихся упоров, а внутренние кулачки — перемещающихся прижимных элементов. При этом усилие зажима не передается на часть кольца, расположенную вне контакта с кулачками, что обеспечивает отсутствие деформаций. Установка внешних кулачков обеспечивается использованием электронной логической схемы, которая отключает механизм синхронного перемещения внешних кулачков при одновременном касании последних с поверхностью зажимаемого кольца. На наружных кулачках имеются опорные элементы, электрически изолированные с помощью диэлектрических прокладок от самого кулачка.

Коммутатор схемы обеспечивает три режима работы устройства: зажим заготовки (двигатель подключен к выходу управляющего усилителя), разжим заготовки (двигатель подключен к источнику напряжения) и нерабочий режим (двигатель подключен к общему проводу электрической схемы). Внутренние кулачки перемещаются поршнями силовых цилиндров, связанных с гидросистемой. Это позволяет иметь одинаковое усилие прижима каждого внутреннего кулачка и обеспечивает возможность простого регулирования усилия закрепления.

Устройство содержит корпус 5, выполненный с радиальными пазами. В пазах расположены наружные кулачки 4 и внутренние 1 кулачки. На наружных кулачках имеются диэлектрические прокладки 4, через которые с ними соединены опорные элементы 2. Прижим колец осуществляется с помощью внутренних кулачков, перемещенных силовыми гидроцилиндрами 6. Внешние кулачки имеют привод от двигателя 7, управляемого электронной схемой, включающей два логических элемента НЕ 8 и 9, логический элемент И — НЕ 10, усилитель 11, коммутатор 12.

В момент постановки зажимаемой заготовки в устройство наружные кулачки 4 находятся в отведенном состоянии. Внутренние кулачки 1 введены в блок гидроцилиндров 6. Заготовка устанавливается в устройство, и коммутатор 12 подключает электродвигатель к источнику питания. На выходе логического элемента 10 выходное напряжение соответствует логической единице, которое усиливается усилителем 11. На выходе усилителя 11 мощности оказывается напряжение, которое поступает на электродвигатель. Работа электродвигателя вызывает перемещение кулачков в сторону зажима заготовки. Движение наружных кулачков происходит до контакта их с заготовкой. При этом под моментом контакта с заготовкой подразумевается момент времени, при котором все кулачки касаются поверхности заготовки одновременно. При

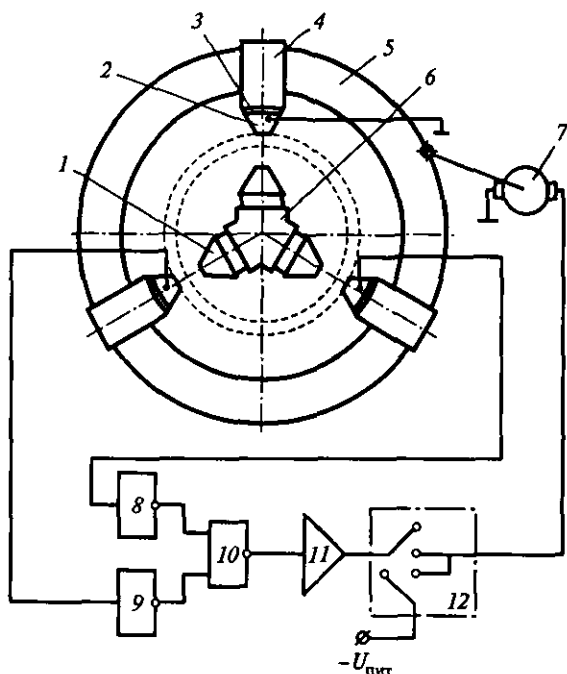


Рис. 10.10. Устройство крепления тонкостенных цилиндрических заготовок:

1 — внутренние кулачки; 2 — опорные элементы; 3 — диэлектрические прокладки; 4 — наружные кулачки; 5 — корпус; 6 — силовые гидроцилиндры; 7 — двигатель; 8, 9 — логические элементы НЕ; 10 — логический элемент И — НЕ; 11 — усилитель; 12 — коммутатор

этом происходит перераспределение значений напряжения на входе логических элементов 8 и 9.

Один из кулачков (на рис. 10.10 — верхний) электрически связан с общим проводом электрической схемы, а два других — с входами логических элементов 8 и 9 соответственно. При замыкании через заготовку всех трех кулачков на выходе логического элемента 10 формируется сигнал логического нуля, двигатель обесточивается и перестает перемещать кулачки. Далее при подаче рабочего тела от внешней системы в блок цилиндров внутренние кулачки 1 перемещаются по радиальным пазам до соприкосновения с деталью и прижимают ее к внешним кулачкам. Сила прижима определяется величиной давления рабочего тела, ее равномерность достигается включением гидроцилиндра каждого из кулачков в общую систему. При окончании обработки и необходимости разжима кольца все операции проводятся в обратной последовательности. Сначала осуществляется отвод внутренних кулачков от детали, а затем подклю-

нием коммутатора 12 к источнику питания производится отвод наружных кулачков и таким образом происходит разжим обработанной детали.

Большие перспективы в настоящее время имеют ТП, основанные на использовании в качестве режущего инструмента лазерного луча. Уникальные возможности лазерной техники позволяют использовать лазеры в ТП контурной обработки как плоских, так и объемных заготовок. Подобные технологические операции существенно повышают производительность при обработке труднообрабатываемых материалов. При этом можно существенно уменьшить расход материала за счет его экономичного раскроя и т. д. Кроме того, обеспечивается обработка уникальных деталей из материалов, к которым вследствие их малой механической прочности нельзя прикладывать усилия резания.

Однако во многих случаях трудно получить требуемое равномерное резание материала по обрабатываемому контуру. На краях заготовки возникают различного рода нарушения поверхностного слоя. Часто наблюдаются существенные различия качества поверхности резания по обрабатываемому контуру даже при однородных физико-химических характеристиках материала в различных точках обрабатываемой заготовки. Это требует применение дополнительных операций механической обработки (слесарной, доводочной), что, в свою очередь, приводит к увеличению припуска материала на обработку, снижению производительности обработки и повышению себестоимости готовой продукции.

Существенное значение при этом имеют параметры ТП обработки. При лазерной обработке важно обеспечить постоянство подводимой энергии луча на всем протяжении обрабатываемого контура. Для этого необходимо обеспечить постоянство площади обрабатываемого материала, что может быть достигнуто фокусированием луча на определенной глубине. Эта задача является тривиальной, если исходить из предположения, что реальная заготовка соответствует заданным геометрическим параметрам.

Производственные наблюдения показывают, что основной причиной неравномерного резания является нестабильность технологического зазора, определяемого расстоянием от сопла лазерной головки до обрабатываемой поверхности заготовки. Это может быть следствием отклонения положения поверхности заготовки от заданного, например, при установке листового материала на стол станка отдельные его зоны могут быть деформированы в результате действия собственной массы, усилий закрепления, условий хранения и т. д.

В последнее время используют бесконтактные методы контроля технологического зазора, с помощью фотоэлектрических, электромагнитных и других датчиков. Однако, имея такие очевидные преимущества, как отсутствие контакта с обрабатываемой поверхностью, датчики не обеспечивают достоверной информацией при определении технологического зазора.

При обработке элементов поверхности заготовки, находящихся вблизи таких элементов поверхности, как «колодцы», пазы, отверстия и им подобных, эти устройства вносят существенные ошибки при определении зазора.

Анализ работы бесконтактных датчиков в производственных условиях позволил выявить причину возникновения ошибок. Обычно датчик имеет чувствительный элемент, фиксирующий технологический зазор в виде некоторой усредненной величины в ограниченной области. В этом случае технологический зазор можно представить в следующем виде:

$$H = \frac{\sum_{n=1}^n H_n}{n}, \quad (10.20)$$

где H_n — технологический зазор в некоторой точке n контролируемой зоны.

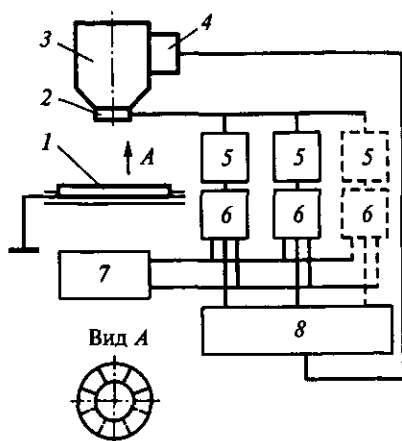
Отсюда видно, что информация о величине H представляет собой усредненное значение реального зазора. Если в момент контроля в зоне измерения форма поверхности отличается от плоской, то и информация о величине H будет отличаться от реальной. Так, например, при обработке поверхности вблизи отверстий, «колодцев» информация о величине H будет иметь существенно завышенное значение. В этом случае исполнительный механизм приблизит сопло лазерной головки к обрабатываемому материалу и обработка будет производиться при меньшем значении H по сравнению с заданной величиной.

Анализ формулы (10.20) показывает, что с целью исключения ошибки при определении величины H анализ информации следует проводить по отдельным точкам контролируемой зоны. Для этого было изготовлено и апробировано сопло лазерной головки с датчиком, имеющим несколько зон измерения (в рассматриваемом случае четыре).

На рис. 10.11 представлена схема установки для выполнения ТП с использованием лазеров. На торце сопла лазерной головки 3 расположена разделенная на отдельные элементы обкладка датчика 2 определения расстояния между соплом лазерной заготовки и плоскостью обрабатываемой заготовки 1. Заготовка связана с общим проводом электрической схемы. Каждый из отдельных элементов обкладки датчика 2 связан со схемой соответствующего управляемого генератора 5. Выход каждого управляемого генератора связан со своим блоком сравнения частот 6, в котором осуществляется расчет и сравнение частоты поступающих импульсов с каждого из управляемых генераторов. Образцовый генератор 7 вырабатывает частоту импульсов, которая определяется из условий оптимальных условий протекания конкретного технологического процесса и устанавливается внешней управляющей ЭВМ.

Рис. 10.11. Схема устройства контроля технологического зазора сопла лазерной головки:

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — обкладка датчика; 3 — торец сопла лазерной головки; 4 — привод вертикального перемещения сопла лазерной головки; 5 — управляемый генератор; 6 — блок сравнения частот; 7 — образцовый генератор; 8 — блок управления приводом вертикального перемещения сопла лазерной головки



Для каждой отдельно взятой части зоны обработки формируется информация о величине технологического зазора:

$$H_i = \frac{\sum_{n_i=1}^{\infty} H n_i}{n_i}, \quad (10.21)$$

где i — индекс, соответствующий конкретной части зоны обработки.

Из формулы (10.21) видно, что если плоская часть заготовки, которая в данный момент времени обрабатывается, полностью перекрывает хотя бы одну из частей контролируемой зоны, то, по крайней мере, одно из значений H оказывается истинным. Следовательно, при производстве таких устройств следует стремиться к максимально возможному дроблению контролируемой зоны на отдельные части.

После получения сформированной информации для каждой части зоны обработки необходимо проанализировать всю информацию об обрабатываемой поверхности. Если зона обработки в текущий момент времени находится вблизи края листа, «колодца», то за истинную величину принимают наименьшее из всех полученных значений H . Если зона обработки находится вблизи элемента с приращением положения своего геометрического элемента в сторону сопла лазерной головки, то за истинную величину принимают наибольшее значение H .

При отсутствии поверхности с измененной высотой относительно поверхности в зоне обработки за истинное значение принимают среднее из всех полученных, т. е.

$$H = \frac{\sum_{m=1}^i H m}{i}. \quad (9.4)$$

При определении истинной величины H возможны различные способы снятия информации с помощью датчиков. Приведенный выше способ относится к статическому способу снятия информации. При этом положение всех чувствительных элементов относительно сопла лазерной головки не меняется во времени и дискретизация площади контролируемой зоны осуществляется за счет выполнения чувствительного элемента датчика в виде информационно-независимых частей.

Наряду с указанным способом существует способ, основанный на динамической дискретизации контролируемой зоны. В этом случае единственный чувствительный элемент датчика выполняется в виде вращающегося сектора с осью вращения, проходящей через ось сопла лазерной головки. Угол его поворота контролируется и последовательно снимаются показания каждый раз при повороте чувствительного элемента на 45° . Вращающийся сектор имеет центральный угол, равный 30° , частота его вращения составляет 1200 об/мин. В указанном датчике используется емкостный принцип формирования информации о величине H .

Применение разработанного устройства в лазерных станках во многих случаях позволяет существенно сократить и даже полностью исключить дополнительную слесарную обработку получаемой поверхности.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите особенности процессов, протекающих в ВПС.
2. Назовите особенности процесса моделирования функционирования ВПС.
3. Чем продиктована необходимость использования метода имитационного моделирования при определении рациональной конфигурации ВПС?
4. Определите особенности эвристического моделирования при формировании ВПС.
5. В чем заключается достоинство метода комбинирования эвристик, использованного при генерации вариантов ВПС?
6. Какие методы и в каких случаях следует использовать при проектировании ТП в условиях функционирования ВПС?
7. Какие подходы следует использовать для ускорения доступа к требуемой информации в БД?
8. Определите, для каких типов производств особенно эффективно применение ВПС, и обоснуйте такое определение.
9. За счет чего достигается высокая эффективность применения ВПС и в чем проявляется этот эффект?
10. Какая информация лежит в основе определения конфигурации ВПС?
11. Как влияют объемы выпуска продукции на формирование ВПС?
12. С помощью каких мероприятий можно снизить время переналадки технологического оборудования, составляющего ПС, на выпуск новой продукции?
13. Какие факторы влияют на достоверность информации, используемой в ММ при формировании ВПС?
14. Каким образом можно формировать рынок услуг для выполнения новых ПЗ?

Заключение

Количественные и качественные изменения в развитии современного автоматизированного машиностроения требуют не простой частичной перестройки отдельных элементов ТП, а глубоких изменений во всем производстве, включая управление и организацию. Эта проблема решается развитием и применением типовых и групповых ТП, информационных технологий и, в частности CALS-технологий, что позволяет сократить объем проектных работ и повысить производительность.

Повышение эффективности автоматизированного производства, в первую очередь, осуществляется путем широкого использования моделирования автоматизированных систем и методов комплексной автоматизации, а также управления производственными процессами и объектами. При этом большое внимание уделяется качеству изготавливаемой продукции машиностроения. При решении этой задачи достаточно глубоко рассматриваются вопросы надежности и применения методов контроля и диагностики.

Создание ВПС на основе РПС решает задачи организации и управления, выпуска изделий на принципиально новой основе. Организация ВПС напрямую связана с технологическим содержанием проекта. В этой связи оказывается возможным выбор лучшей, в рамках текущих возможностей распределенных производственных систем структуры ВПС путем варьирования структурами ТП.

В условиях ВПС проектирование ТП, их реализация и управление могут быть обеспечены только при наличии мощных средств вычислительной техники, использующей базы данных и знаний и составляющих основу информационного обеспечения интеллектуальной системы.

Содержание данного учебника направлено на повышения уровня знаний у студентов машиностроительных специальностей. В рамках данной книги предполагается многовариантность изучаемых задач применительно к конкретной специализации инженеров.

Студенты должны знать и уметь решать конкретные задачи компьютеризированного машиностроительного производства, в том числе компоновочного решения производства, инструментального обеспечения, контроля и диагностики, роботизации, транспортирования систем управления и др.

Список литературы

1. *Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении* /Под ред. Н.М. Капустина. — М.: Машиностроение, 1985.
2. *Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения* /Под ред. А.Г. Раковича. Г.К. Горанский, Л.В. Губич, В.И. Махнач и др. — Минск, ИТК АН Беларусь 1997.
3. *Автоматизированные системы проектирования технологических процессов механосборочного производства* / Под ред. Н.М. Капустина. — М.: Машиностроение, 1979.
4. *Андреев Г.Н., Новиков В.Н., Схиртладзе А.Г.* Проектирование технологической оснастки машиностроительного производства. — М.: Высшая школа, 2002.
5. *Андрющенко В.А.* Следящие системы автоматизированного сборочного оборудования. — Л.: Машиностроение, 1979.
6. *Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.* Управление электроприводами. — Л.: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1982.
7. *Вентцель Е.С.* Исследование операций: задачи, примеры, методология. — М.: Наука, 1988.
8. *Вороненко В.П., Схиртладзе А.Г., Брюханов В.П.* Автоматизированное производство. — М.: Высшая школа, 2001.
9. *Гибкие производственные комплексы* /Под ред. П.Н. Белянина, В.А. Лещенко. — М.: Машиностроение, 1984.
10. *Гэзиров Р.И., Серебренникий П.П.* Программирование обработки на станках с ЧПУ. — Л.: Машиностроение, 1990.
11. *Диалоговое проектирование технологических процессов.* Н.М. Капустин, В.В. Павлов, Л.А. Козлов и др. — М.: Машиностроение, 1983.
12. *Евгениев Г.Б.* Системология инженерных знаний. — М.: Изд-во. МГТУ им. Баумана, 2001.
13. *Капустин Н.М.* Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ. — М.: Машиностроение, 1976.
14. *Капустин Н.М., Васильев Г.Н.* Автоматизация конструкторского и технологического проектирования. Система автоматизированного проектирования. В 9 кн. Кн. 6. — М.: Высшая школа, 1986.
15. *Капустин Н.М., Дьяконова Н.П., Кузнецов П.М.* Автоматизация машиностроения/Под ред. Н.М. Капустина. — М.: Высшая школа, 2002.
16. *Капустин Н.М., Кузнецов П.М.* Структурный синтез при автоматизированном проектировании технологических процессов деталей с использованием генетических алгоритмов // Информационные технологии, 1998. № 4. С. 34–37.
15. *Капустин Н.М., Кузнецов П.М.* Формирование виртуальной производственной системы для выпуска изделий в распределенных системах //Машиностроитель. 2002. № 6. С. 42–46
16. *Козырев Ю.Г.* Промышленные роботы: Справочник. — М.: Машиностроение, 1988.

17. Кузнецов М.М., Усов Б.А., Стародубов В.С. Проектирование автоматизированного производственного оборудования. — М.: Машиностроение, 1987.
18. Металлорежущие станки и автоматы / Под. ред. А.С. Проникова. — М.: Машиностроение 1981.
19. Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы. — М.: Высшая школа, 1980.
20. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств/Под ред. Н.М. Макарова. В 9 кн. Кн. 5. — М.: Высшая школа, 1986.
22. Машиностроение. Энциклопедия. Раздел III. Технология производства машин / Под ред. П.Н. Белянина. — М.: Машиностроение, 2000.
23. Мухин А.В. Новые концепции организации промышленного производства // Наука производству. 2001. №5. С. 2 – 7.
24. Норенков И.П. Принципы построения и структура. Системы автоматизированного проектирования. В 9 кн. Кн. 1. — М.: Высшая школа, 1986.
25. Норенков И.П. Разработка САПР. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1994.
26. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.
27. Основы автоматизации машиностроительного производства /Под. ред. Ю.М. Соломенцева. — М.: Высшая школа, 1999.
28. Норенков И.П., Кузьмин П.К. Информация поддержки наукоемких изделий. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
29. Павлов В.В. Типовые математические модели в САПР ТП. — М.: Мосстанкин, 1989.
30. Павлов В.В. CALS-технологии в машиностроении (математические модели). — М.: Изд-во МГТУ Станкин, 2002.
31. Программное управление станками / Под ред. В.Л. Сосонкина. — М.: Машиностроение, 1981.
32. Павлов В.В. CALS-технологии в машиностроении (математические модели). — М.: Изд-во МГТУ Станкин, 2002.
33. Роботизированные производственные комплексы/Под ред. Ю.Г. Козырева, А.А. Кудинова. — М.: Машиностроение, 1987.
34. Справочник технолога машиностроителя / Под ред. А.М. Дальского. В 2 т. — М.: Машиностроение, 2001. «Издательство машиностроение – 1».
35. Схиртладзе А.Г., Соколов В.И., Фадеев В.А. Металлорежущие станки с программным управлением и подготовки программ. — Харьков: Высшая школа, 1992.
36. Технология машиностроения. Основы технологии машиностроения/Под ред. А.М. Дальского. В 2 т. Т. 1. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997.
37. Технология машиностроения. Производство машин/Под ред. Г.Н. Мельникова. В 2 т. Т. 2. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998.
38. Технология производства гусеничных и колесных машин / Под ред. Н.М. Капустина. — М.: Машиностроение, 1989.
39. Трудоношин В.А., Пивоварова Н.В. Математические модели технических объектов. В 9 кн. Кн. 4. — М.: Высшая школа, 1986.

Учебное издание

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Под редакцией **Капустина Н.М.**

Редактор *Н. Е. Овчеренко.*

Художественный редактор *А. Ю. Войткевич.*

Технический редактор *Л. А. Овчинникова.*

Корректор *В. В. Кожуткина.*

Компьютерная верстка *С. М. Хос*

Лицензия ИД № 06236 от 09.11.01.

Изд. № РЕНТ-85. Сдано в набор 16.06.03. Подп. в печать 04.02.04.

Формат 60×88 $\frac{1}{16}$. Бум. офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.

Объем 25,48 усл. печ. л., 25,98 усл. кр.-отт.

Тираж 3000 экз. Зак. № Э-184

ФГУП «Издательство «Высшая школа», 127994, Москва, ГСП-4,
Неглинная ул., 29/14.

Тел.: (095) 200-04-56.

E-mail: info@v-shkola.ru <http://www.v-shkola.ru>

Отдел реализации: (095) 200-07-69, 200-59-39, факс: (095) 200-03-01.

E-mail: sales@v-shkola.ru

Отдел «Книга-почтой»: (095) 200-33-36.

E-mail: bookpost@v-shkola.ru

Отпечатано в типографии ГУП ПИК «Идел-Пресс».

420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2.